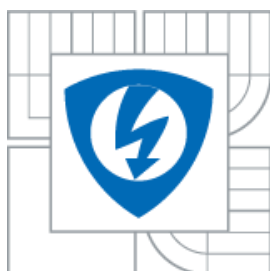




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

MĚŘENÍ DYNAMICKÝCH VLASTNOSTÍ BIPOLÁRNÍCH TRANZISTORŮ

BASIC MEASUREMENT OF DYNAMIC PROPERTIES OF BIPOLAR TRANSISTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

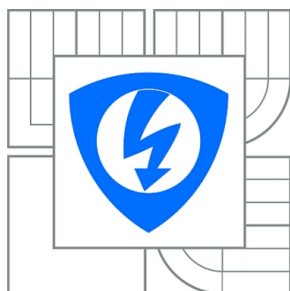
JURAJ REPČÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. JIŘÍ DŘÍNOVSKÝ, PH.D.

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Juraj Repčík

ID: 154841

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Měření dynamických vlastností bipolárních tranzistorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy měření dynamických parametrů polovodičových součástek (např. bipolárních tranzistorů). Na základě těchto znalostí navrhnete měřicí pracoviště pro měření těchto parametrů polovodičových součástek pro různé pracovní body. Dále navrhnete univerzální měřicí přípravek pro laboratorní úlohu. Pro tato měření využijte vhodných laboratorních přístrojů (např. Agilent 34410A, E3646A, 33220A a 54621A).

V grafickém programovacím prostředí LabVIEW naprogramujte automatické měření základních dynamických parametrů polovodičových součástek. Dále vytvořte přehledné ovládací prostředí. Vytvořený program opatřete stručným leč výstižným laboratorním návodem, aby mohl posloužit jako podklady pro laboratorní úlohu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] BOUŠEK, J., Elektronické součástky. Elektronický učební text. Brno: FEKT, VUT v Brně.
- [2] BITTER, R., MOHIUDDIN, T., NAWROCKI, M., LabVIEW: Advanced Programming Techniques, CRC Press 2007.

Termín zadání: 12.2.2015

Termín odevzdání: 4.6.2015

Vedoucí práce: Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D.

Konzultanti semestrální práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
Předseda oborové rady

Abstrakt

Cieľom bakalárskej práce je rozobrať teoretický základ merania bipolárnych tranzistorov. V prvom rade statické vlastnosti BJT, nastavenie jednosmerných napätí a prúdov v elektrickom obvode (pracovný bod). Ďalej rozoberá meranie vybraných dynamických vlastností zosilňovača s bipolárnym tranzistorom. Teoretické poznatky sú prezentované na praktickom zapojení a laboratórnom meraní týchto vlastností s pripojenými laboratórnymi meracími prístrojmi. Meranie je automatizované pomocou počítača s vývojovým prostredím LabVIEW. Sú vyvinuté užívateľské programy na zmeranie V-A charakteristík bipolárneho tranzistora a meranie dynamických vlastností zosilňovača. Práca poukazuje na výhodný spôsob vývoja programového vybavenia pre automatizovanie merania pomocou grafického programovania v LabVIEW.

Kľúčové slová

tranzistor, pracovný bod, bipolárny, dynamické vlastnosti, LabVIEW

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to analyze theoretical basis of measurement bipolar transistors. First, this project focuses on the static parameters of a bipolar transistor, setting DC voltages and currents in an electric circuit (Q-point, operating point). Second it deals with measurement of selected dynamic properties of amplifier with bipolar transistor. Theoretical knowledge is presented on the practical circuit by a laboratory measurement of the selected properties. The measurement is automated using a computer with LabVIEW software. User programs are developed for measuring the V-A characteristics of a bipolar transistor and for measuring selected dynamic properties of the amplifier. The thesis points out a convenient approach in development of new software for automated measurement using graphical programming in LabVIEW.

Keywords

transistor, operating point, bipolar, dynamic properties, LabVIEW

REPČÍK, J. *Měření dynamických vlastností bipolárních tranzistorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Dřínovský, Ph.D..

Prehlásenie

Prehlasujem, že bakalársku prácu na tému „**Meranie dynamických vlastností bipolárnych tranzistorov**“ som spracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti z vytvorením tejto práce som neporušil autorské práva tretích osôb a predovšetkým som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích osobnostných autorských práv a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa

.....
podpis autora

Pod'akovanie

Touto cestou vyslovujem poďakovanie vedúcemu bakalárskej práce Ing. Jiřímu Dřínovskému, Ph.D. za odborné usmernenie pri spracovaní danej témy.

V Brne dňa

.....
podpis autora

Obsah

Úvod	1
1. Teoretická časť	2
1.1 Bipolárny tranzistor (BJT)	2
1.2 DC pracovný bod BJT	5
1.3 Meranie linearity	6
1.3.1 Linearita v závislosti na amplitúde vstupného signálu	6
1.3.2 Celkové harmonické skreslenie (THD, THD+N)	7
1.4 Zosilnenie	10
1.5 LabVIEW	10
2. Prípravky na meranie	12
2.1 Statické charakteristiky	12
2.2 Dynamické vlastnosti	13
2.2.1 Realizácia zapojenia	14
3. Meranie statických charakteristík	17
3.1 Vývoj programu	19
3.1.1 Nastavenie merania	19
3.1.2 Meranie	21
3.1.3 Zobrazenie výsledkov	23
3.1.4 Použité Sub-VI	24
3.2 Analýza zmeraných grafických závislostí	25
4. Meranie dynamických vlastností	30
4.1 Vývoj programu	30
4.2 Nastavenie merania	30
4.3 Linearita a THD+N	32
4.4 Frekvenčná charakteristika	35
4.5 Prúdová prevodná charakteristika	36
Záver	38
Literatúra	39
Prílohy	42

A.	Laboratórna úloha č.1	i
B.	Laboratórna úloha č.2	viii
C.	Laboratórna úloha č.3	xv

Zoznam obrázkov

Obr. 1: Základné zapojenia bipolárneho tranzistora, spoločný emitor - SE, spoločná báza - SB, spoločný kolektor – SC [5]	3
Obr. 2: Charakteristiky bipolárneho tranzistoru v zapojení so SE, prevzaté z [6]	3
Obr. 3: Hybrid-pi model tranzistoru	4
Obr. 4: DC obvod jednoduchého zosilňovača s BJT	5
Obr. 5: Určenie pracovného bodu tranzistora	6
Obr. 6: Príklad merania linearity amplitúdy $U_{OUT}=f(U_{IN})$	7
Obr. 7: Bloková schéma THD+N analyzátoru	8
Obr. 8: rovnaké merané THD+N vyjadrené v % a v dBV, prevzaté z [11]	9
Obr. 9: Schéma zapojenia merania	12
Obr. 10: Návrh zapojenia pre AC meranie	13
Obr. 11: Návrh DPS v mierke 1:1	15
Obr. 12: Prípravok na meranie dynamických vlastností; a) pohľad zhora b) pohľad z boku	16
Obr. 13: Maximálnych parametre z katalógového listu KU612 [12]	17
Obr. 14: Vývojový diagram merania statických charakteristík	18
Obr. 15 : Stavový automat	19
Obr. 16: Sprievodca nastavením prístrojov 1/3	20
Obr. 17 : Nastavenie krokovania v programe	21
Obr. 18: Meranie R_B v programe	22
Obr. 19: Blokový diagram merania charakteristík (ukážka)	22
Obr. 20 : Reprezentácia dát v poli	23
Obr. 21 : Výber bodov na vykreslenie jednotlivých kvadrantov - oranžová - os X, modrá – os Y, šípka – ďalšia charakteristika	24
Obr. 22 : Niektoré použité Sub-VI v programe	25
Obr. 23 : Výstupné charakteristiky meraného BJT	26
Obr. 24: Prúdové prevodné charakteristiky meraného BJT	27
Obr. 25 : Vstupné charakteristiky meraného BJT	28
Obr. 26 : Napäťové prevodné charakteristiky meraného BJT	28
Obr. 27: Zobrazenie štyroch kvadrantov charakteristík	29
Obr. 28: Obrazovka DC nastavenia	31

Obr. 29: Vývojový diagram - polenie intervalov	32
Obr. 30: Meranie linearity + THD+N	33
Obr. 31: Určenie P1dB	34
Obr. 32: Časový priebeh vstupného signálu o veľkosti P1dB (modrá) a výstupného signálu (ružová) – snímok z osciloskopu	34
Obr. 33: Frekvenčná charakteristika	36
Obr. 34: Prúdová prevodná charakteristika pre striedavý signál	37

Úvod

Tranzistor je elektronická súčiastka, ktorá sa nachádza prakticky v takmer každom elektronickom zariadení. Z toho dôvodu je potrebné poznať jej princípy fungovania.

Aby tranzistor v požadovanej aplikácii plnil svoju funkciu správne, je dobré vedieť jeho parametre. Len na vykreslenie statických charakteristík bipolárneho tranzistoru (BJT) je treba meniť napätia a prúdy v širokom rozsahu a odčítať mnoho hodnôt z meracích prístrojov. Manuálne meranie by trvalo dlhý čas a mohlo by zaniest ďalšie chyby. Toto sú dôvody prečo je výhodné meranie automatizovať. Prístroje sú ovládané z počítača s vhodným softvérovým vybavením. Program meranie vyhodnotí a poskytne želaný výsledok. Meraniu statických charakteristík BJT sa venuje prvá časť bakalárskej práce, v ktorej bolo vytvorené automatizované meranie na zistenie týchto závislostí, ktoré vypovedajú o vlastnostiach použitého tranzistora.

Druhá časť sa venuje dynamickým vlastnostiam zapojenia zosilňovača s bipolárnym tranzistorom. Bol navrhnutý a vyrobený prípravok na toto meranie a pomocou vyvinutého programu zmerané závislosti určitých veličín popisujúcich striedavý signál.

Programy na automatizované meranie boli vytvorené vo vývojovom prostredí LabVIEW s pripojenými meracími prístrojmi. Pomocou týchto programov bolo vykonané demonštratívne meranie na prípravkoch a získané dáta boli reprezentované do grafov s možnosťou uloženia do súboru.

1. Teoretická časť

V tejto časti práce je spracovaná teória ako komponentov na ktorých bude prebiehať meranie (tranzistory) tak aj definície a metodika merania jednotlivých veličín a závislostí.

1.1 Bipolárny tranzistor (BJT)

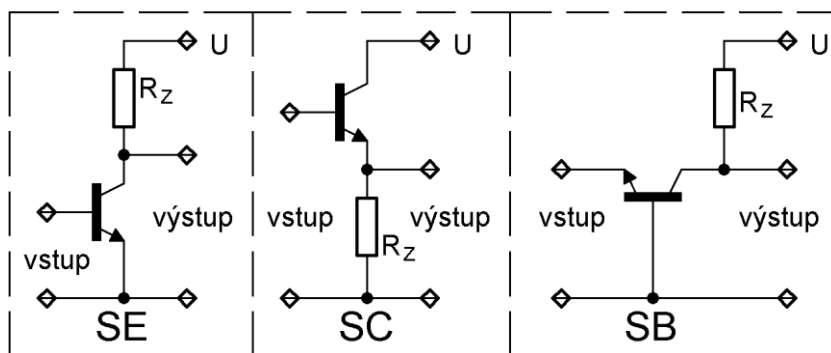
Bipolárny tranzistor, anglicky *bipolar junction transistor* (BJT), je trojvrstvová polovodičová súčiastka ktorá v dvoch kombináciách spája dotované polovodiče typu P a N. Má 3 vývody označované báza (B), kolektor (C) a emitor (E). Existujú dve možné konfigurácie: typ NPN a typ PNP. V bakalárskej práci sa používa iba s typ NPN, pretože druhý typ tranzistoru sa dá vysvetliť a zmerať analogicky (zmenou polaritu napätia). Nepatrné kvantitatívne rozdiely sú vo vyššej rýchlosti a nižšej kapacite polovodičového prechodu tranzistoru typu NPN, spôsobené vyššou difúznou rýchlosťou elektrónov ako dier [1].

Technologické prevedenie, fyzikálne princípy v polovodičoch a ich výpočty sú uvedené v zdrojoch [2], [3] a [4].

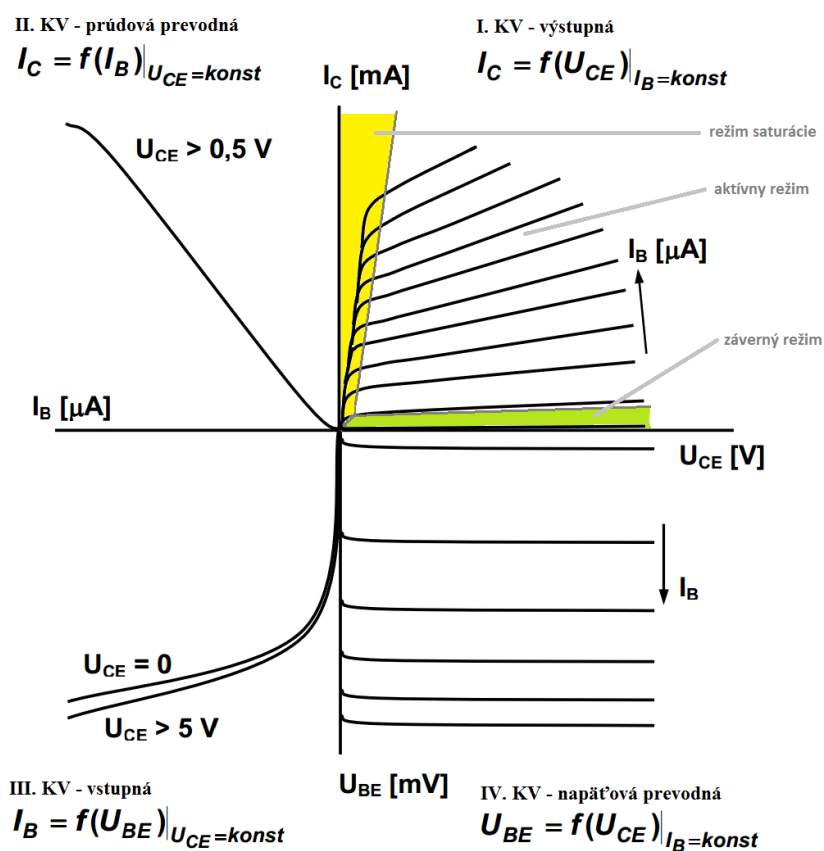
NPN tranzistor možno zapojiť do obvodu v troch základných zapojeniach a to so spoločným emitorom (SE), kolektorom (SC) alebo bázou (SB) (obr. 1).

- SE: Dosahuje najväčšie výkonové zosilnenie, pretože sa zosilňuje napätie aj prúd. Fáza napätia medzi vstupným a výstupným striedavým napätím je 180° . Prúd je vo fáze. V takomto zapojení sa spolu s ďalšími obvodovými súčiastkami dajú realizovať zosilňovače pracujúce v audio pásme (20 Hz – 20 kHz) ale aj vo vyšších frekvenciách.
- SB – Napätové zosilnenie je veľké (desiatky až stovky), prúdové je menšie ako jedna. Vstupný odpor je veľký (100 k Ω – 1 M Ω). Zapojenie sa nazýva aj „impedančný konvertor“. Používa sa na snímanie signálov zo zdrojov ktorých výstup sa nemôže zatážovať ako sú typicky napríklad antény.
- SC – Naopak ako u SB, napätové zosilnenie dosahuje hodnotu o málo menšiu od 1, prúdové je ale veľké a výstupný prúd je v protifázi. Vstupný odpor je oveľa väčší od výstupného, preto sa s výhodou používa na prúdové zosilnenie signálu zo zariadenia s veľkým výstupným odporom alebo na úpravu signálu pre pripojenie na väčšiu záťaž (menší odpor).

Pre zapojenie NPN BJT so spoločným emitorom je znázornená ukážka typických charakteristík na obr. 2, kde U_{CE} znamená napätie medzi kolektorom a emitorom, U_{BE} je napätie medzi bázou a emitorom, I_C je prúd tečúci do kolektoru, I_B je prúd tečúci do bázy. Charakteristiky sa rozdeľujú na 4 časti – tzv. kvadranty. Každý z nich má inú funkčnú závislosť s určitým parametrom - taktiež zobrazené na obrázku.



Obr. 1: Základné zapojenia bipolárneho tranzistora, spoločný emitor - SE, spoločná báza - SB, spoločný kolektor – SC [5]



Obr. 2: Charakteristiky bipolárneho tranzistoru v zapojení so SE, prevzaté z [6]

BJT v zapojení so SE môže pracovať v troch režimoch (obr. 2):

- Režim saturácie – prechod BE aj BC sú v priepustnom smere
- Záverný režim – prechod BE aj BC sú polarizované záverne
- Aktívny normálny režim kedy je prechod BE je v priepustnom smere a BC v závernom

Bázovým prúdom sa dá riadiť kolektorový prúd. Pomer týchto jednosmerných (statických) prúdov definuje prúdový zosilňovací činiteľ β (1), označovaný aj ako

hybridný parameter h_{21E} . Dynamické prúdové zosilnenie v danom pracovnom bode (Q) definuje parameter h_{21e} – pomer zmeny I_C ku zmene I_B (2). Určujú sa pri konštantnom U_{CE} .

$$\beta = h_{21E} = \frac{I_C}{I_B} [-] \quad (1)$$

$$\Delta\beta = h_{21e} = \frac{dI_C}{dI_B} [-] \quad (2)$$

Tieto parametre sú číselne veľmi podobné tak sa v praxi často pokladajú za zhodné a platí $h_{21E} \approx h_{21e}$. Typické hodnoty sa pohybujú od 5 pre výkonové tranzistory až do 5000 pri tzv. „super-beta“ tranzistoroch [1].

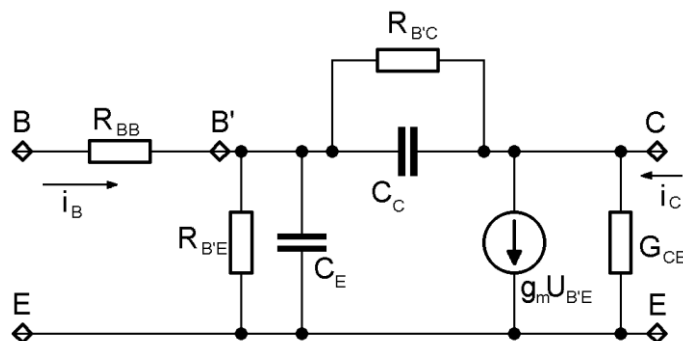
Ďalšie parametre tranzistora sú napríklad strmosť tranzistoru S (3), vstupný odpor r_{in} (4) a výstupný odpor r_{out} (5). Taktiež platia iba pri danom pracovnom bode.

$$S = \frac{dI_C}{dU_{BE}} [S] \quad (3)$$

$$r_{in} = \frac{dU_{BE}}{dI_B} [\Omega] \quad (4)$$

$$r_{out} = \frac{dU_{CE}}{dI_C} [\Omega] \quad (5)$$

Dynamické vlastnosti BJT sa modelujú hybrid-pi modelom (známym tiež ako Giacolettov model) zobrazeným na obr. 3. Segment B' predstavuje vnútornú bázu tranzistora. Vstupný odpor tranzistora určujú odpory R_{BB} a $R_{B'E}$ spolu s kapacitou C_E , ktorá zastupuje bariérovú kapacitu PN prechodu a difúznú kapacitu. Odpor $R_{B'C}$ modeluje odpor prechodu báza-kolektor ktorý je v zapojení SE v aktívnom režime polarizovaný v závernom smere, takže odpor nadobúda veľkých hodnôt. Prúd spätnoväzobnou kapacitou C_C sa zvyšuje pri stúpajúcej frekvencii a tým znižuje napätie $U_{B'E}$, ktorým je riadený výstupný prúdový zdroj. Keďže signál na báze a kolektore sú v protifázi, takýmto spôsobom sa znižuje prúdové zosilnenie so stúpajúcou frekvenciou.



Obr. 3: Hybrid-pi model tranzistoru

1.2 DC pracovný bod BJT

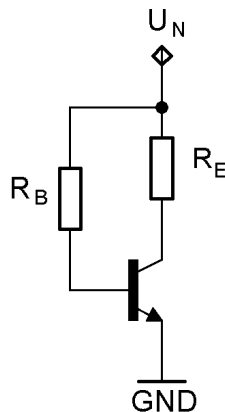
Nastavením pracovného bodu za rozumie určenie jednosmerných prúdov a napätí v obvode s bipolárnym tranzistorom. V anglickej literatúre sa nazýva „quiescent point“, skrátene „Q-point“. Pri nastavovaní sa uvažuje iba DC obvod, takže akumulčné prvky sú vyradené. Cievky sú v praxi nahradené skratom (prípadne odporom vodiča vinutia) a kondenzátory rozpojením. Pracovný bod sa dá zakresliť do výstupných charakteristík, takže je jednoznačne daný napätím U_{CE} a prúdom I_C .

Striedavá zložka signálu sa do zosilňovača (obr. 4) privádza cez väzobný kondenzátor do bázy tranzistoru. Výstup striedavej zložky sa odvádza cez kondenzátor z kolektora. Pre maximálny rozkmit je najlepšie voliť napätie na kolektore približne v polovici napájacieho napätia U_N .

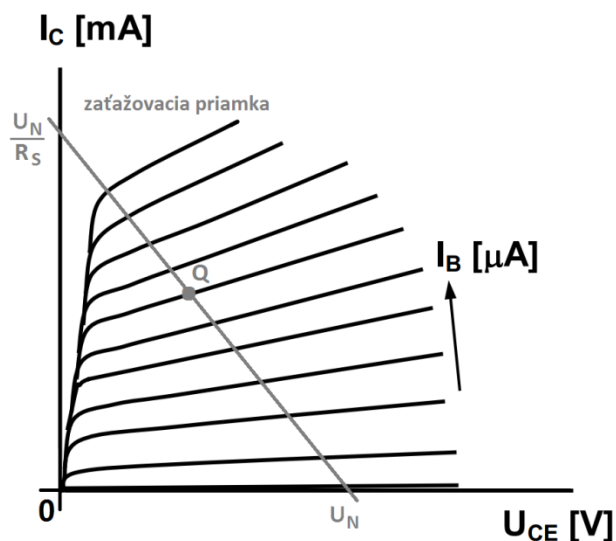
Na nastavenie pracovného bodu v zapojení na obr. 4 je zvolený kolektorový prúd (v medziach tranzistora), tým úbytok napätia na R_E a napätie U_{CE} . Podelením I_C parametrom h_{21E} sa spočíta bázový prúd. V aktívnom režime sa predpokladá $U_{BE} \approx 0,7$ V pre kremikový tranzistor. Bázový odpor je vypočítaný pomocou ohmového zákona z bázového prúdu a napätia $U_N - 0,7$ V. Pre grafické zobrazenie je možné pomocou 2. Kirchhoffovho zákona zostaviť rovnicu slučky vedenej odporom R_E , kolektorom a emitorom do zeme (6). Rovnica (6) sa dá upraviť do tvaru (7), ktorý zodpovedá rovnici zaťažovacej priamky. Táto priamka je zakreslená do výstupných charakteristík (obr. 5). Striedavú zložku si možno graficky predstaviť v zmene I_B a tak pohybe bodu Q (priesečník výstupnej charakteristiky pre dané I_B a zaťažovacej priamky) po zaťažovacej priamke.

$$0 = -U_N + I_C R_C + U_{CE} \quad (6)$$

$$I_C = \frac{-U_{CE}}{R_C} + \frac{U_N}{R_C} \quad (7)$$



Obr. 4: DC obvod jednoduchého zosilňovača s BJT



Obr. 5: Určenie pracovného bodu tranzistora

Postup nastavenia pracovného bodu v iných zapojeniach je uvedený v publikácii [9].

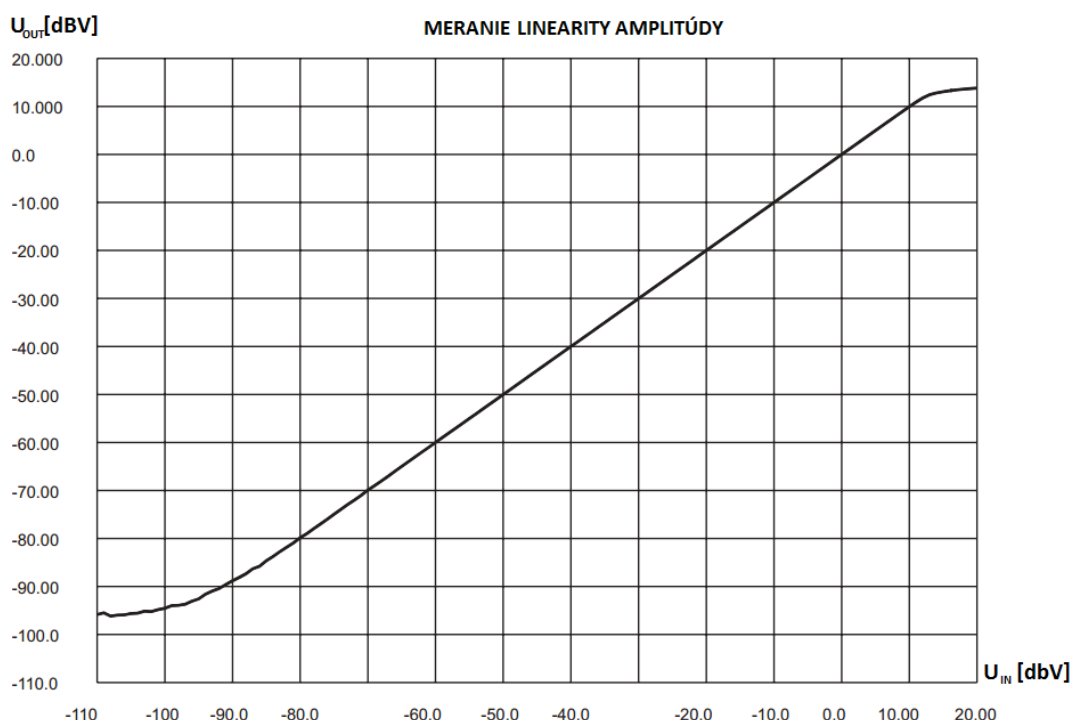
1.3 Meranie linearity

Testované zariadenie s lineárnou prenosovou funkciou (vstupno-výstupný vzťah signálov) bude reprodukovat' vstupný signál na výstupe v presne rovnakom tvare, len zmenšený alebo zväčšený v amplitúde podľa zosilnenia alebo útlmu zariadenia.

V zosilňovačoch je snaha dosiahnuť čo najlepšej linearity. Pre porovnanie rôznych zapojení existuje rada spôsobov merania linearity. Výstupom meraní môže byť závislosť amplitúdy výstupného signálu na amplitúde vstupného signálu, ale aj napríklad meranie celkového harmonického skreslenia (THD) ako aj THD vrátane šumu, intermodulačné skreslenie a iné.

1.3.1 Linearita v závislosti na amplitúde vstupného signálu

Linearitu v amplitúde zobrazuje grafická závislosť výstupnej amplitúdy na vstupnej. Je jedna s priamych metód merania linearity. Veľkosť vstupného spravidla harmonického signálu sa mení v širokom rozsahu až do maximálnej hodnoty zakiaľ sa meria výstupné napätie. obr. 6 zobrazuje príklad nameranej linearity amplitúdy signálu zariadenia s napäťovým zosilnením $A_U = 0$ [dB]. Pri nízkych vstupných napätiach sa na výstupe prejaví šum zariadenia. Lineárna závislosť sa porušuje aj pri napätiach blízkom maximu, kedy nastáva orezávanie (angl. „clipping“) signálu spôsobené limitom dynamického rozsahu.



Obr. 6: Príklad merania linearity amplitúdy $U_{OUT}=f(U_{IN})$

Za vstupné a výstupné premenné sa podľa testovaného zariadenia môže považovať amplitúda alebo efektívna hodnota napätia, prúdu alebo výkonu. Výkon sa často vyjadruje v jednotkách dBm (meraný výkon vzťahnutý k jednému miliwattu).

1.3.2 Celkové harmonické skreslenie (THD, THD+N)

Jedna z možností ako overiť kvalitu zosilňovača je meranie THD alebo THD+N. Pri meraní je na vstup privedený harmonický signál s jednou harmonickou zložkou. Prechodom signálu cez zariadenie môže nepatrne zmeniť tvar. Pri zobrazení spektra je v mnohých prípadoch možné vidieť superponované ďalšie harmonické zložky a šum, ktorý znehodnocuje priebeh výstupného napätia ev. prúdu.

THD

THD je definované ako pomer odmocniny súčtu vyšších harmonických oproti odmocnine z prvej harmonickej zložky signálu.

Pre získanie hodnoty THD je potrebné vedieť amplitúdy jednotlivých harmonických zložiek signálu. Merané môžu byť spektrálnym analyzátorom alebo širokopásmovým osciloskopom, ktorý dokáže spracovať frekvencie aspoň 10 krát vyššie ako 1. harmonická meraného signálu. Meraný časový priebeh je následne algoritmom FFT prevedený na spektrum, kde sa dajú harmonické zložky vyčítať. Pre dostatočnú presnosť určenia THD postačuje poznať amplitúdy po 5. - 6. harmonickú zložku. Pri meraní je dobré špecifikovať najvyššiu harmonickú napr. „THD po 5. harmonickú“.

Hodnota harmonického skreslenia sa potom vypočíta podľa vzťahu [10]:

$$THD = 100 \cdot \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2}} [\%], \quad (8)$$

kde U_n je efektívna hodnota napätia danej harmonickej zložky vo voltoch.

Ak sú merané výkony tak sú dosadené do vzorca (9) v jednotkách watt:

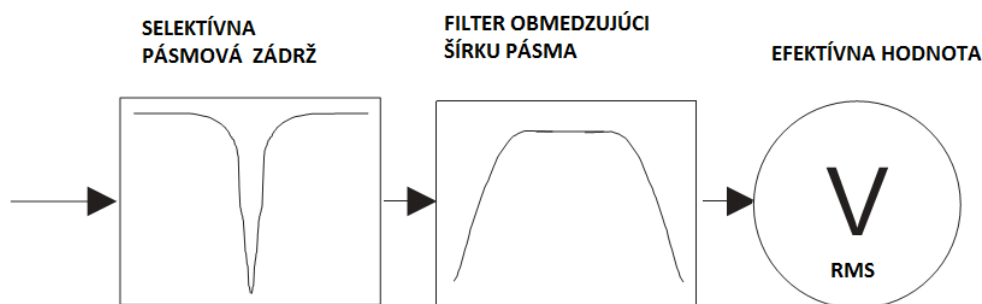
$$THD = 100 \cdot \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + P_4 + \dots + P_n}{P_1}} [\%]. \quad (9)$$

Všeobecná bloková schéma merania, príklad výpočtu a porovnanie merania spektrálnym analyzátorom oproti meraniu osciloskopom sa nachádza v publikácii [10].

THD+N

Najbežnejšia metóda na meranie skreslenia je práve THD+N. obr. 7 zobrazuje zjednodušenú blokovú schému THD+N analyzátoru. V prvej časti je selektívna laditeľná pásmová zádrž, ktorá je automaticky ladená na frekvenciu prvej harmonickej zložky a tým ju (takmer úplne) utlmí (100 – 120 dB). Filter by nemal utlmiť iné frekvencie a ani ostatné harmonické zložky pôvodného signálu. Všetok šum a rušivé signály mimo zádržné pásmo filtru prejdú netlmené. Preto má názov merania príponu „+N“, ktorá reprezentuje šum, po anglicky *noise*. Meraná hodnota obsahuje informáciu aj o šume ktoré zariadenie produkuje. Koncept merania je založený na tom, že čokoľvek iné ako testovací signál na výstupe zariadenia znehodnocuje jeho parametre a tomu zodpovedá aj meraná hodnota.

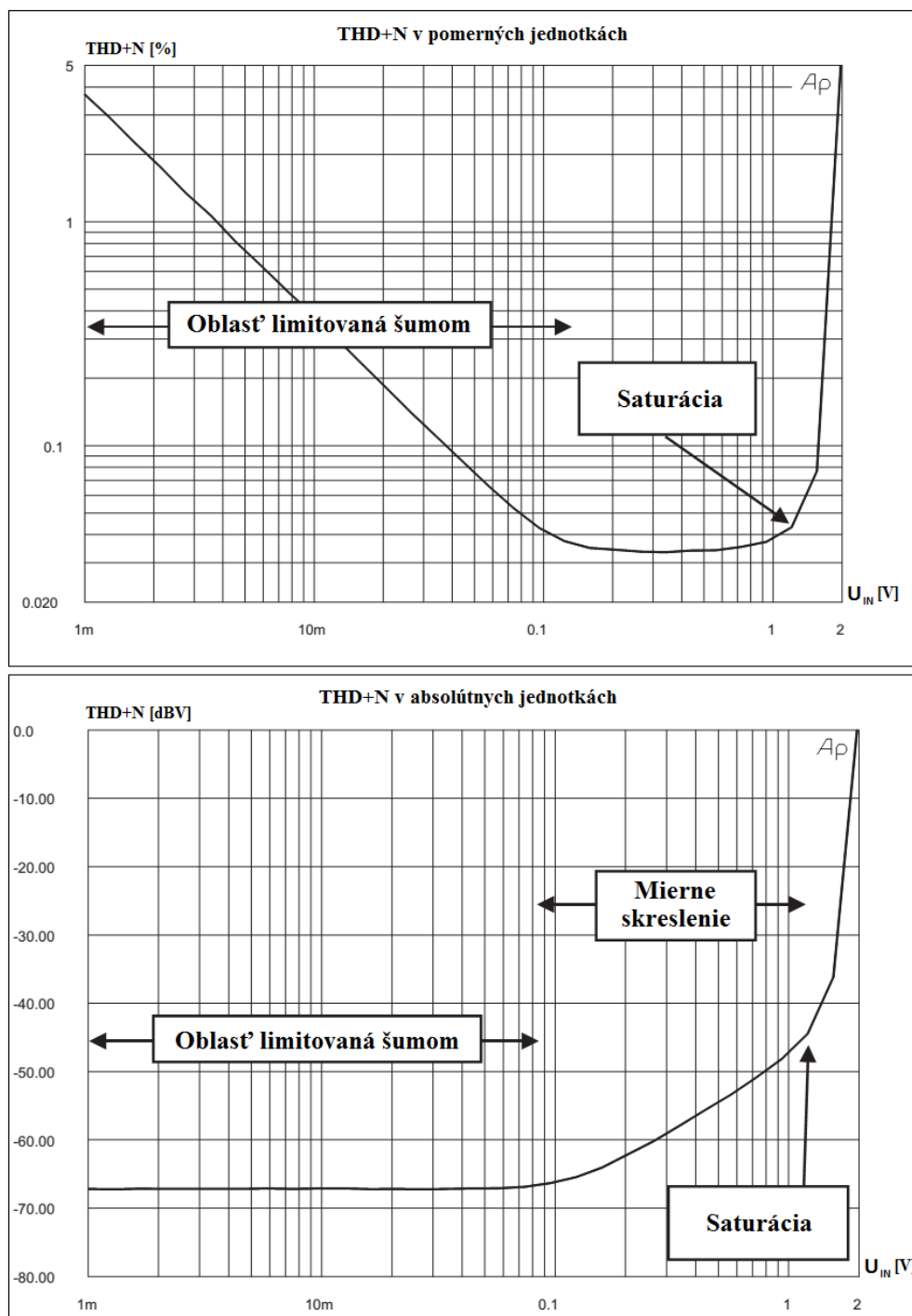
Väčšina modernej audio techniky (ekvalizéry, predzosilňovače, atď.) majú úroveň skreslenia menšiu ako biely šum v celom neobmedzenom frekvenčnom rozsahu. Vtedy by meranie THD+N odrážalo iba úroveň šumu. Preto sa do analyzátorov zaraďuje ďalší blok – pásmová priepusť obmedzujúca šírku iba na pracovné frekvencie. Výsledok THD+N sa zobrazuje na voltmetri zobrazujúcom efektívnu hodnotu napätia.



Obr. 7: Bloková schéma THD+N analyzátoru

Očakávané výsledky merania na zosilňovači sú, že so zvyšujúcou sa amplitúdou vstupného signálu porastie aj THD+N (vplyvom orezania amplitúdy nad dynamický rozsah aplikácie). Treba však dbať na správnu reprezentáciu hodnôt. Meranie sa dá

vyhodnotiť v absolútnych jednotkách (V, dBV a pod.) ale aj v pomerných jednotkách ku 1. harmonickej signálu na výstupe aplikácie (v % alebo dB). Obr. 8 ukazuje iné podanie výsledku, avšak rovnaké namerané dáta. Prvý graf ukazuje THD+N v [%], druhý graf v [dBV]. Pri malých amplitúdach je energia bieleho šumu väčšia ako energia harmonických od 2. zložky. Preto je najprv meraný prakticky len šum (N) v pomere k amplitúde (1. harmonickej) a až pri väčších signáloch je merané skutočné skreslenie (THD).



Obr. 8: rovnaké merané THD+N vyjadrené v % a v dBV, prevzaté z [11]

1.4 Zosilnenie

Všeobecne pri zosilňovačoch je možné určiť tri druhy zosilnenia, ktoré dávajú do pomeru výstupnú veličinu ku vstupnej:

- Napät'ové – A_U ,
- Prúdové – A_I ,
- Výkonové – A_P ,

pričom ich hodnoty sú určené zo striedavých zložiek napätí a prúdov.

Pre maximalizovanie zosilnenia výslednej aplikácie je nutné dôsledne vyberať aktívne prvky v zapojení a nastaviť im vhodné pracovné podmienky.

Pri bipolárnom tranzistore sa využíva jeho možnosť riadiť veľký kolektorový prúd oveľa menším bázovým prúdom. Spomínaný parameter h_{21e} určuje koľko krát je väčší I_C od I_B . Pri striedavých signáloch sa prejavuje v závislosti od frekvencie pokles tohto parametru. Priebeh funkcie $h_{21e} = f(f)$ pri zosilňovači s BJT pripomína pásmovú priepusť. Pri nízkych frekvenciách je prenos menší spravidla z dôvodu použitia väzobných kondenzátorov s konečnou kapacitou takže spolu s odpormi v zapojení tvoria CR článok. Pri vysokých frekvenciách sa uplatňujú neideálne vlastnosti tranzistora. Väzobné kapacity majú v tomto prípade reaktanciu blízku nule, ktorá sa môže zanedbať. Frekvencia pri ktorej frekvenčná charakteristika klesá na úroveň -3 dB oproti nominálnemu zosilneniu sa nazýva medzná frekvencia a označuje sa f_0 . Frekvencia pri ktorom klesne hodnota h_{21e} na 0 dB sa nazýva tranzitná frekvencia f_T .

1.5 LabVIEW

LabVIEW (*Virtual Instrument Engineering Workbench*) je vývojárske softvérové prostredie, ktoré vytvorila firma National Instruments (NI). Prvá verzia bola vydaná na platformu Apple Macintosh v roku 1986. Dnes je LabVIEW multiplatformový softvér ktorý funguje na väčšine osobných a priemyselných počítačoch, dokonca na niektorých mobilných zariadeniach.

Tento nástroj je prispôsobený hlavne na implementovanie automatických meracích systémov, spracovanie signálov, zber dát (*data acquisition - DAQ*) a ich vyhodnotenie. Možnosti sú ale takmer neobmedzené, takže môže slúžiť aj všeobecne k tvorbe počítačových programov dokonca programovania FPGA integrovaných obvodov.

Najväčšia odlišnosť od iných programovacích jazykov a prostredí je, že LabVIEW používa grafický programovací jazyk (G). Princíp programovania je vo vkladaní rôznych komponentov tzv. nody (*nodes*) a štruktúr (*structures*) a vzájomným prepojením drôťmi (*wires*). Programátor tak dokáže efektívnejšie a rýchlejšie zrealizovať svoju predstavu do programu, pretože nepotrebuje mať znalosť syntaxe (kľúčových slov, kontextu) ako je to v textovo založených programovacích jazykoch. NI prináša vyššiu úroveň abstrakcie kódu za účelom zrýchlenia a zefektívnenia práce.

Výsledkom programovania je vytvorenie „virtuálneho prístroja“ ktorý LabVIEW ukladá do súboru s koncovkou „.vi“. VI (*virtual instrument*) je rozdelený do dvoch častí:

- **Predný panel** (*front panel*)– predstavuje grafické prostredie ku ktorému pristupuje koncový užívateľ. Obsahuje ovládacie prvky (*controls*) a indikátory (*indicators*). Patria medzi ne napríklad tlačidlá, polia na vpísanie textu či čísel, svetelné indikátory, grafy a iné.
- **Blokový diagram** (*block diagram*)– prostredie na tvorbu grafického kódu kde vývojár umiestňuje komponenty podľa požadovanej funkcie programu.

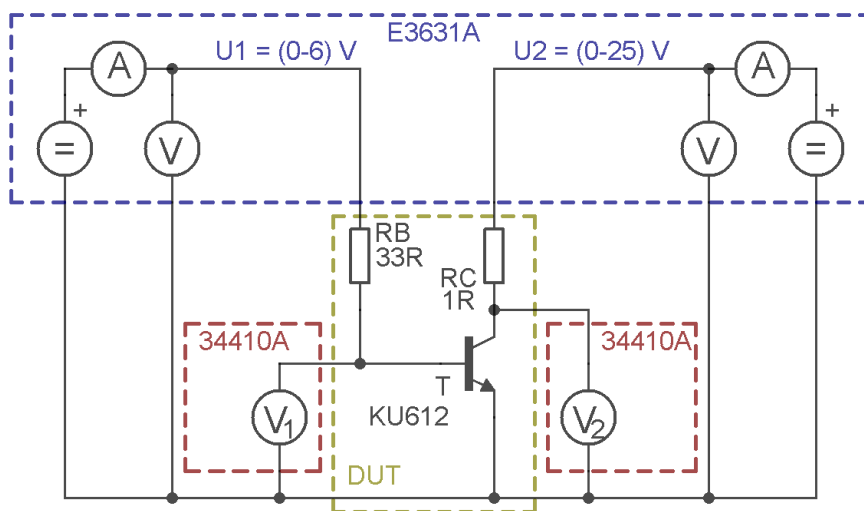
V tejto bakalárskej práci je systém LabVIEW použitý na meranie a vyhodnotenie. Existujú viaceré spôsoby automatického získania meraných dát do počítača a následne do LabVIEW. Prvým sú systémy na zber dát (*DAQ systems*) ktoré majú radu analógových a digitálnych vstupov a výstupov (podľa modelu) s ktorými sa dá z programu komunikovať. Sú pripojené ako periféria rôznymi spôsobmi ako sú napr. USB, Ethernet, PCI, PXI alebo bezdrôtovo. LabVIEW disponuje aj možnosťou pripojiť meracie prístroje za pomoci ovládačov (*driverov*). Pri meraní v tejto práci sú prístroje prepojené do jednej zbernice štandardu GPIB (*General Purpose Interface Bus*). Táto zbernica je pomocou prevodníka GPIB/USB pripojená do počítača. GPIB zbernicu riadia v LabVIEW NI-VISA ovládače ktoré značne zľahčujú získanie dát z prístrojov. Pre osciloskop je použité pripojenie cez LAN.

2. Prípravky na meranie

Táto kapitola rozoberá prípravkami použitými a navrhnutými na meranie statických charakteristík (jednosmerný obvod) a na meranie so striedavým signálom. Výsledky samotného DC merania sú v kap. 3. Dynamické vlastnosti s výslednými grafmi sú v kap. 4.

2.1 Statické charakteristiky

Meranie statických charakteristík bipolárneho tranzistora bolo použité existujúce zapojenie prípravku so schematickým zapojením zobrazeným na obr. 9. Je použitý tranzistor KU612 [12]. Jedná sa o NPN výkonový tranzistor (10 W) s maximálnym kolektorovým prúdom $I_C = 3$ A. Rezistor R_B plní ochrannú funkciu, aby nebolo možné nastaviť veľký bázyový prúd. Rezistory je možné použiť na detekciu prúdov.



Obr. 9: Schéma zapojenia merania

Zariadenia použité pri meraní:

- Agilent E3631A [13], zdroj s dvoma použitými výstupmi
- Agilent 34410A [14], voltmetre V_1 a V_2

Zdroj a voltmetre sú pripojené do zbernice GPIB, ktorá je následne pripojená cez USB/GPIB prevodník do počítača. Na ovládanie prístrojov sú dostupné ovládače NI-VISA, ktoré riešia komunikáciu po zbernici, takže programátor prístupuje k prístrojom pomocou prehľadných príkazov.

Detailnejší popis prístrojov:

Agilent E3631A je zdroj s tromi výstupmi:

- 1.výstup: $U = 0 \div 6$ V; $I = 0 \div 5$ A
- 2.výstup: $U = 0 \div 25$ V; $I = 0 \div 1$ A
- 3.výstup: $U = 0 \div -25$ V; $I = 0 \div 1$ A

Presnosť nastavenia a odčítanej hodnoty je

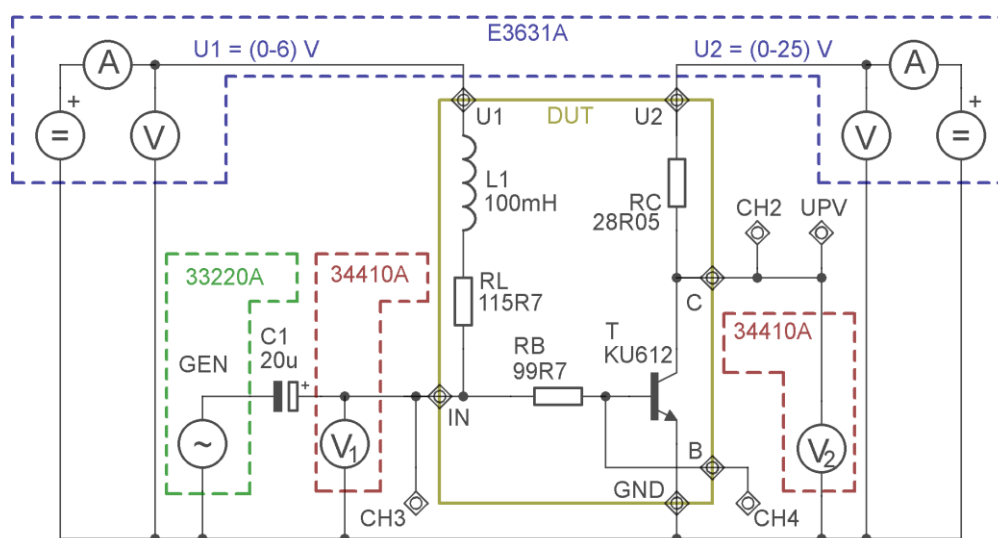
- na 1. výstupe $0,1\% + 5 \text{ mV}$, $0,2\% + 10 \text{ mA}$ s rozlíšením najviac $1 \text{ mV}/1 \text{ mA}$
- na 2. a 3. výstupe $0,1\% + 20 \text{ mV}$, $0,15\% + 4 \text{ mA}$ s rozlíšením najviac $10 \text{ mV}/1 \text{ mA}$

Tento prístroj je v meraní použitý na nastavenie prúdu do bázy a napätia U_2 .

Agilent 34410A je multimeter s možnosťou merania napätia a prúdu (DC, AC RMS) ale aj odporu, kapacít, diód a teploty. Na rozsahu 100 V má presnosť $\pm(0,0030\% \text{ z odčítanej hodnoty} + 0,0005\% \text{ z rozsahu})$. V zapojení sú použité dva tieto prístroje na meranie U_{BE} a U_{CE} .

2.2 Dynamické vlastnosti

Na základe skúseností z merania jednosmerných napätí a prúdov, bolo v rámci tejto práce navrhnuté zapojenie prípravku na meranie so striedavými napätiami a prúdmi (obr. 10). Bol použitý rovnaký tranzistor, zdroj aj voltmetre. Na vstupe zapojenia je cez väzobný kondenzátor C_1 pripojený generátor. Kapacita $20 \mu\text{F}$ bola dosiahnutá paralelným spojením dvoch keramických SMT kondenzátorov $10 \mu\text{F}$. Generátor tak dodáva striedavú zložku signálu do obvodu, kde je nastavené jednosmerné napätie (*offset*) pomocou zdroja U_1 a súčiastok vstupného obvodu. Tlmivka L_1 slúži v obvode na oddelenie striedavej zložky od zdroja (pre striedavý signál je to zem) aby sa redukoval vstupný výkon. Odpor R_L reprezentuje odpor vinutia tlmivky L_1 . Ďalej bol pridaný odpor R_B , ktorý slúži na meranie priebehu bázevého prúdu z rozdielu napätí na svorkách CH4 a CH3, na ktoré je pripojený osciloskop. Kolektor tranzistora T sa v obvode spája s odporom R_C ktorý obmedzuje maximálny kolektorový prúd a tiež umožňuje nastaviť kolektorové napätie v polovici napájacieho: $U_{CE} = U_1 / 2$. Vhodným zvolením napätí U_1 a U_2 sa nastaví pracovný bod tranzistoru T. Na výstupe obvodu je pripojený osciloskop (svorka CH2) a audio analyzátor (svorka UPV). Pri meraní striedavých zložiek signálov na osciloskope bola použitá AC väzba.



Obr. 10: Návrh zapojenia pre AC meranie

Svorka C oproti zemi (GND) slúži na meranie striedavého napätia u_{CE} a prúdu i_C ako úbytku na rezistore R_C , pričom druhý kontakt rezistora je uzemnený cez zdroj U_2 (pre striedavý signál).

Použité meracie prístroje:

- | | | |
|---------------------|----------------|------|
| • DC zdroj: | Agilent E3631A | [13] |
| • Voltmeter V1, V1: | Agilent 34410A | [14] |
| • Osciloskop: | R&S RTM 1054 | [15] |
| • Generátor: | Agilent 33220A | [16] |
| • Audio analyzátor: | R&S UPV | [17] |

Prístroje boli podobne ako pri meraní statických charakteristík pripojené do zbernice GPIB. Osciloskop bol pripojený cez LAN, pretože nedisponuje zbernicou GPIB.

Pridaním súčiastok do zapojenia spôsobilo, že merané priebehy sa týkajú celého zapojenia ako zosilňovača s bipolárnym tranzistorom v triede A [18] (podľa nastavenia pracovného bodu). Z tohto dôvodu je meranie linearity, frekvenčnej charakteristiky a prúdovej prevodnej charakteristiky pre striedavé zložky signálu vzťahované na zapojenie zosilňovača. Vstupom meraného obvodu (DUT) sa rozumie svorka IN. Výstup je kolektor tranzistora, teda svorka C.

Konkrétne merania spolu s vývojom programu sú zhrnuté v kap. 4.

2.2.1 Realizácia zapojenia

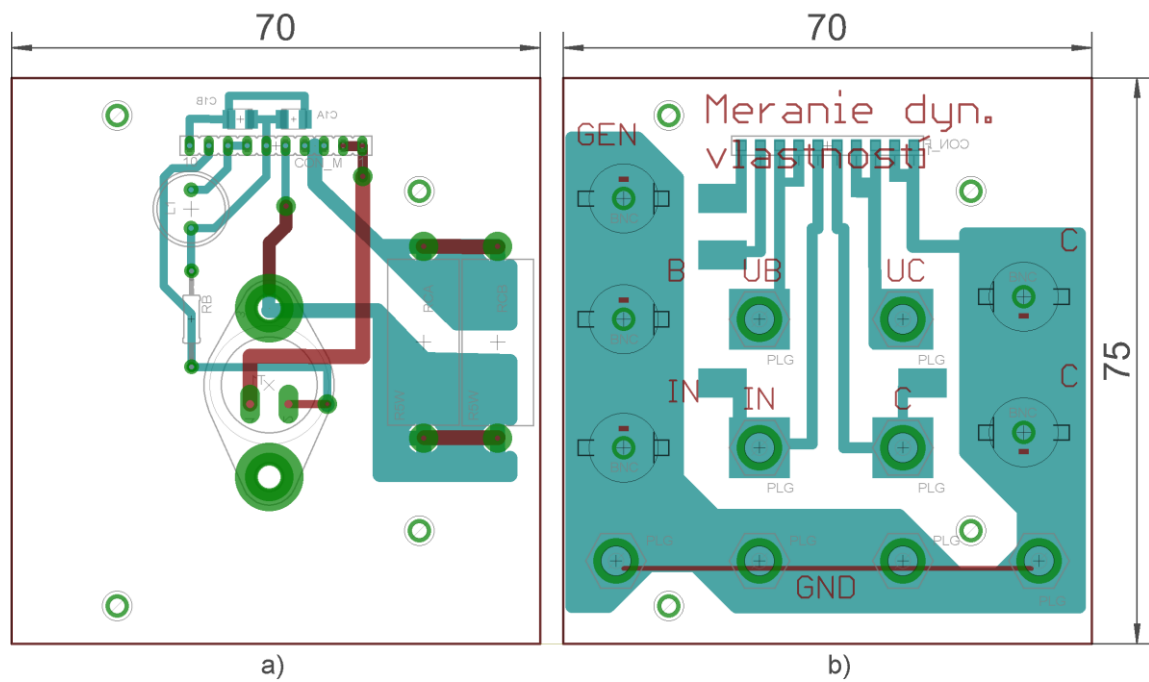
Na tranzistore môže byť pri meraní výkonová strata do 7 W, preto musí byť upevnený na chladiči s dostatočnou plochou. V konštrukcii prípravku chladič tvorí tiež podstavec na ktorom sú uchytené ostatné mechanické časti. Na návrh dosiek plošných spojov (DPS) bol použitý program EAGLE. Zoznam súčiastok je v tab. 1.

Na rozmiestnenie všetkých súčiastok a konektorov sú použité dve dosky plošných spojov s obojstranným vodivým motívom. Prvá doska je pripevnená ku chladiču s tranzistorom a spája jeho kontakty s ostatnými súčiastkami (obr. 11a). Druhá doska je uchytená skrutkami na dištančných stĺpikoch od prvej. Tvorí predný panel prípravku, takže sa tu nachádzajú konektory na pripojenie meracích zariadení a zdrojov. Popis dosky je vyleptaný ako vodivý motív vrchnej strany (obr. 11b). Elektrické pripojenie týchto dvoch dosiek paralelne umiestnených nad sebou je riešené desiatimi zásuvnými kontaktami, kde na vrchnej doske je prispájkovaná SMT dutinková lišta a na spodnej doske sú trčiace kontakty ktoré do nej pri montáži zapadnú.

Generátor, osciloskop a audio analyzátor sú pripojené BNC konektormi. Voltmetre a zdroje sa pripájajú do prislúchajúcich označených prístrojových zdierok. Celková podoba prípravku je zobrazená na obr. 12.

Tab. 1: Zoznam súčiastok

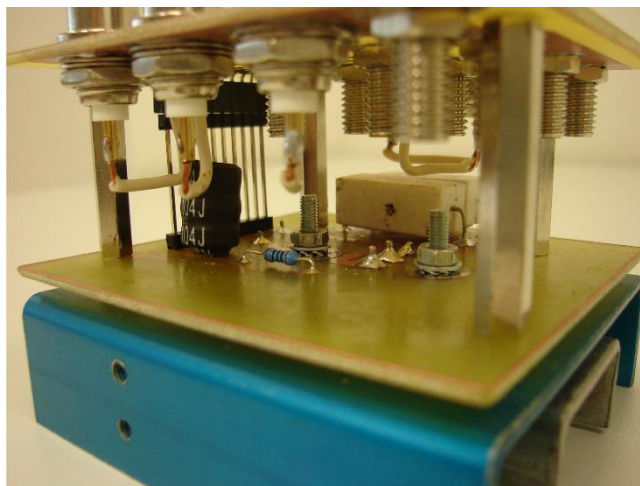
Označenie	Model/hodnota	Popis
BNC	BNC-Z 50	Koaxiálny konektor
PLG	4mm	Prístrojová zdierka
CON_F	BLW10G	Dutinková lišta SMT
T1	KU612	Tranzistor v puzdre TO66
L1	Fastron 11P-104J	Tlmička 100mH / 40mA
RB	100 Ω	Bázový odpor
RCA,RCB	56 Ω	Kolektorový odpor, 5W
C1A,C1B	10 μ F / 25V	Väzobné kondenzátory
CON_M	ASS12045G	Obojstranný kolík, THT



Obr. 11: Návrh DPS v mierke 1:1



a)



b)

Obr. 12: Prípravok na meranie dynamických vlastností; a) pohľad zhora b) pohľad z boku

3. Meranie statických charakteristík

Schéma zapojenia prípravku aj s priradením prístrojov je zobrazené na obr. 9. V obvode budú merané veličiny:

- Bázový prúd – I_B
- Kolektorový prúd – I_C
- Napätie U_{BE}
- Napätie U_{CE}

Prúdy je možné odčítať priamo na zdroji, ale hlavne u bázového prúdu by sa týmto zvýšila chyba merania. Preto je využitá druhá možnosť, a to zisťovať bázový prúd z úbytku napätia na odpore R_B . Nominálna hodnota odporu R_B bude overená štvorvodičovým meraním v programe. Zmeraný odpor je zavedený ako konštanta do programu podľa ktorej sa vyhodnocuje prúd podľa rozdielu napätí nameraných zdrojom a voltmetrom V_1 .

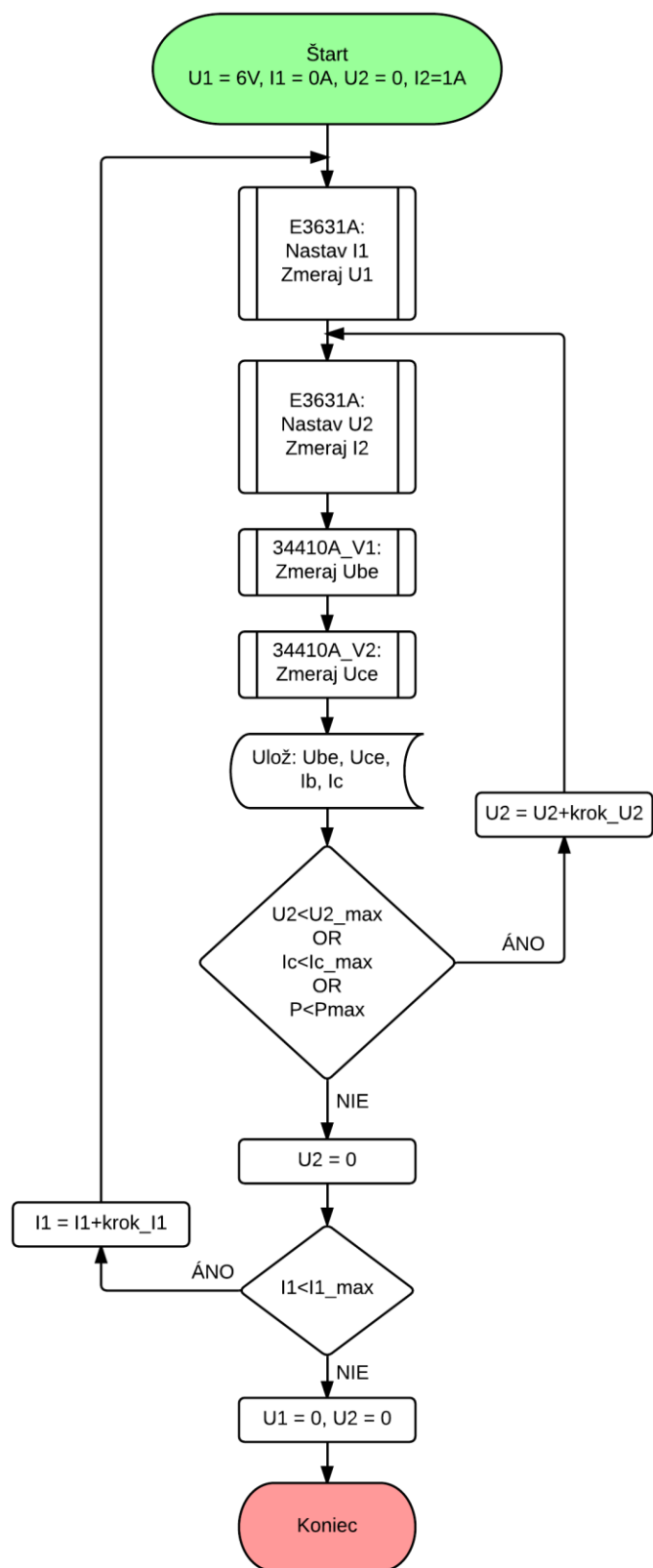
Pri meraní sa dá nastavovať iba napätie U_1 a U_2 , prípadne prúdové obmedzenie týchto napäťových výstupov. Keďže pri nastavení nie je možné vedieť presné hodnoty meraných veličín I_B , I_C , U_{BE} , ani U_{CE} , je potrebné napätia nastavovať s obozretnosťou a prihliadnutím na maximálne hodnoty prípustné pre tranzistor. Maximálne parametre pre KU612 použitý v prípravku sú na obr. 13.

Typ	Mezní hodnoty					
	U_{CB0}	U_{CE0}	I_C	U_{EB0}	P_{tot}	ϑ_j
	V	V	A	V	W	°C
KU612	120	80	3	3	10	155

Obr. 13: Maximálnych parametre z katalógového listu KU612 [12]

Koncepčný algoritmus merania (získania dát) je zobrazený vývojovým diagramom na obr. 14. Pri počiatkovo vynulovaných hodnotách sa na začiatku vykoná kontrolné meranie, následne sa overí podmienka prekročenia nastavených limitov. Limity je potrebné voliť s dostatočnou rezervou závislou od veľkosti krokovania napätí. Ak sú všetky limity v medziach, meranie pokračuje zvyšovaním napätia U_2 o zadaný krok. Po premeraní U_{CE} až po maximálnu hodnotu sa U_2 vynuluje a volí sa vyšší prúd I_1 . Pri tomto prúde sa zase zmeria celý povolený rozsah obmedzený kolektorovým prúdom, napätím na kolektore a maximálnou výkonovou stratou. Po následných zvýšeníach I_1 , nastane iterácia v ktorej nie je podmienka $I_1 < I_{1_max}$ splnená a meranie tak končí na maximálnom povolenom bázovom prúde.

Meranie je koncipované na krokovaní I_1 a U_2 . Zdroj U_1 je nastavený na maximálnu hodnotu (6 V) a jeho prúdové obmedzenie na začiatku na 0 A. Nastavená hodnota I_1 zodpovedá bázovému prúdu (do určitej hodnoty). Ochranný odpor R_B a vstupný odpor tranzistora voči zemi spolu s maximálnym napätím zdroja U_1 určuje najväčšiu hodnotu bázového prúdu. Bázový prúd bude vždy o niečo menší od nastavenej hodnoty I_1 . Viac o nastavení správneho krokovania je v kap. 3.1.



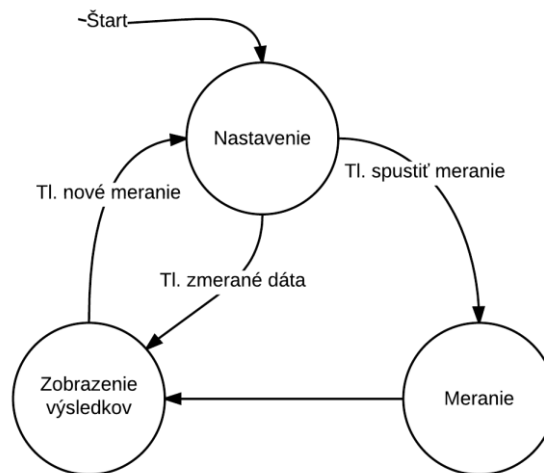
Obr. 14: Vývojový diagram merania statických charakteristík

3.1 Vývoj programu

Keďže blokový diagram (ekvivalent zdrojového kódu v grafickom programovaní) programu je veľmi rozsiahly a štruktúrovaný, nie je možné ho zobraziť v tomto dokumente. Celý program je priložený ako elektronická príloha.

V texte sú rozobraté základné funkcie programu a niektoré vytvorené Sub-VI (podprogramy), ktoré sa v hlavnom programe nachádzajú. Popis vybraných Sub-VI je v kapitole 3.1.4.

Celý algoritmus sa vykonáva v troch stavoch stavového automatu (obr. 15).



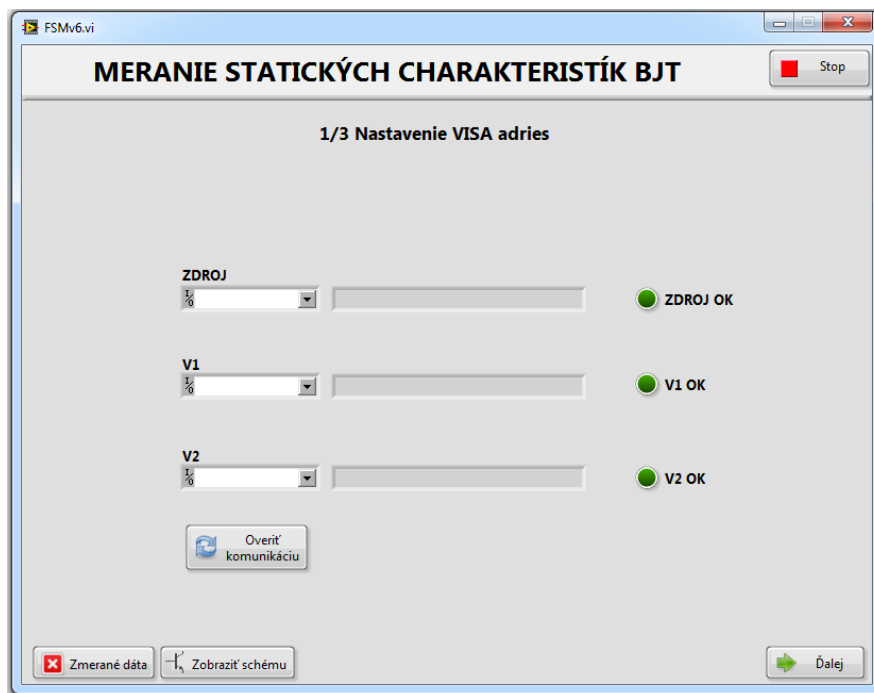
Obr. 15 : Stavový automat

3.1.1 Nastavenie merania

Stav v stavovom automate na obr. 15 „Nastavenie“ (v diagrame nazvané „Wizard“) pozostáva z troch krokov:

1. Nastavenie VISA adres zariadení
2. Nastavenie krokovania U_1 a I_1
3. Nastavenie tranzistora, potvrdenie

Po spustení aplikácie sa zobrazí nastavovacie menu pre pripojenie prístrojov (obr. 16). Pri zvolení adresy zdroja a voltmetrova sa dá tlačidlom overiť komunikácia a skontrolovať správne zapojenie. Pri vymenení adres na inú pozíciu sa objaví dialógové okno upozorňujúce na nesprávne pripojenie. Na ovládanie prístrojov sú použité NI-VISA ovládače. Po stlačení tlačidla „Overiť komunikáciu“ sa otvorí VISA komunikácia pre všetky prístroje, následne sa odošle do každého príkaz „*IDN?“. Prístroj odošle svoju identifikáciu, ktorá sa v ďalšom kroku prečíta. Komunikačný kanál pre každý prístroj sa potom zavrie. Identifikačný reťazec znakov sa vypíše na obrazovku, porovná sa s nadefinovaným a prebehne vyhodnotenie správneho pripojenia.



Obr. 16: Sprievodca nastavením prístrojov 1/3

Samotný priebeh správneho pripojenia a komunikácie prebieha nasledujúcimi fázami:

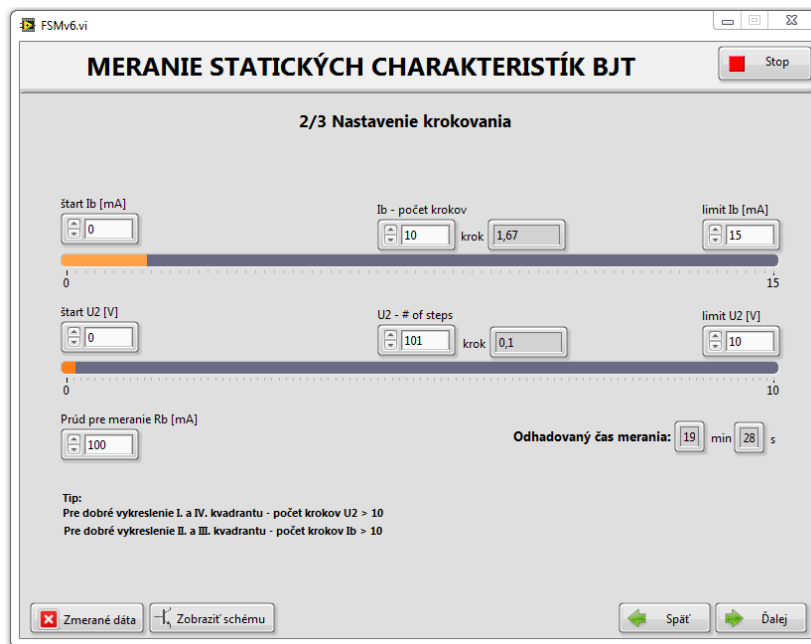
1. otvorenie komunikácie,
2. zápis príkazu,
3. čítanie odpovede,
4. (ďalšie príkazy a čítanie dát)
5. uzavretie spojenia,

prebieha všetka komunikácia s prístrojmi. Pri meraní je potrebné zadávať príkazy na zistenie aktuálneho napätia, prípadne prúdu. Taktiež je nevyhnutné nastavovať zdroje podľa zvoleného krokovania (obr. 17). Podľa nastavenia počtu krokov a limitov sa automaticky prepočítava veľkosť kroku a zobrazuje na indikátore. Okamžite sa tiež zobrazuje odhadovaný čas merania, ktorý bol stanovený experimentálne. Jedna iterácia merania pri jednom nastavenom U_2 trvá približne 1,1 sekundy. Nastavenie krokovania sa volí z ohľadom na požadované výsledky. V kvadrantoch charakteristík kde je veličina parametrom, je dostatočné voliť menší počet krokov (počet charakteristík) vzťahnutej veličiny na nastavenie. Druhá nastavená hodnota sa krokuje jemnejšie pre získanie viac bodov na charakteristiku. K napätiu U_{CE} a prúdu I_C je vzťahnuté nastavenie zdroja U_2 . K napätiu U_{BE} a prúdu I_B je to prúdový zdroj I_1 , takže je výhodné voliť:

- Menší krok U_2 , väčší krok I_1 na vykreslenie I. a IV. kvadrantu.
- Väčší krok U_2 , menší krok I_1 na vykreslenie II. a III. kvadrantu.

Pri nastavení krokovania sa generujú dva vektory podľa ktorých budú riadené cykly pri meraní.

V tejto časti programu sa dá zvoliť prúd pre štvorbodové meranie bázevého odporu (rozobraté bližšie v kap. 3.1.2).



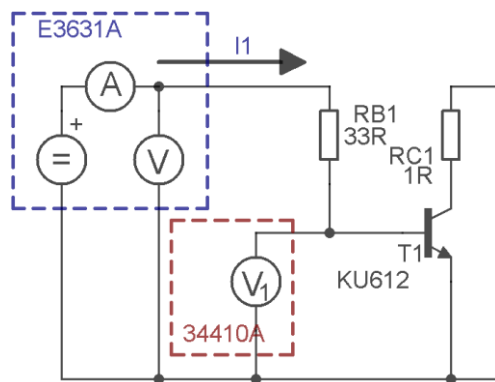
Obr. 17 : Nastavenie krokovania v programe

Na tretej stránke nastavení sa dá zvoliť možnosť zobrazenia krivky maximálneho výkonu vo výstupných charakteristikách pre zadanú hodnotu a spustiť meranie.

3.1.2 Meranie

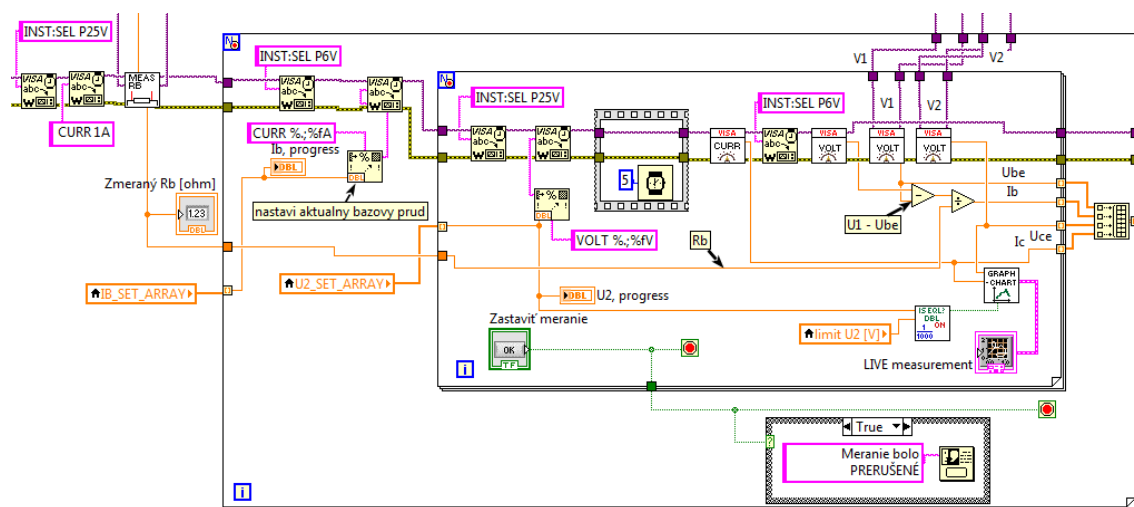
Samotné meranie začína počiatočným resetom zariadení. Po zresetovaní sa vyberie zdroj U_2 (obr. 19) a nastaví sa na ňom prúdové obmedzenie na 1 A, čo je maximálna hodnota. Následne beh programu pokračuje v Sub-VI „Meraj R_b stvorbodovo.vi“. Tam je nastavený zdroj U_2 na 0 V čo prakticky zemní kolektorový odpor. Limit U_1 sa nastaví na 6 V so zadaným prúdom v nastavení merania. Ide o prúd do bázy tranzistora ktorý sa bude uzatvárať cez priechod BE a prechod BC do zeme. Meranie znázorňuje obr. 18. Je nutné dbať na limity tranzistora. Potom sa zmeria napätie U_1 a tiež napätie U_{BE} multimetrom V_1 . Hodnota odporu je vypočítaná podľa vzťahu (12).

$$R_B = \frac{U_1 - U_{BE}}{I_1} [\Omega] \quad (12)$$



Obr. 18: Meranie R_B v programe

Ak už je známa hodnota odporu program pracuje v dvoch „for“ slučkách (cykloch), ktoré sa vykonajú toľko krát, aká je dĺžka predom vygenerovaných vektorov s hodnotami na nastavenie. Nastaví sa teda prvá hodnota prúdu I_1 pri čom sa postupne nastavujú všetky hodnoty U_2 , zakaždým sa počíta bázyový prúd ako úbytok na odpore R_B . V každom kroku sa na obrazovke zobrazí aktuálny stav merania a vykresľuje sa daná výstupná charakteristika (pre užívateľskú kontrolu). Algoritmus pokračuje nastavením ďalšej hodnoty I_1 z predom vygenerovaného vektora až po koniec.



Obr. 19: Blokový diagram merania charakteristík (ukážka)

Na výstupe sa vytvorí z nameraných dát trojrozmerné pole. V riadkoch poľa sú 4 merané parametre (U_{BE} , I_B , U_{CE} , I_C). Stĺpce reprezentujú jednotlivé kroky merania podľa U_2 . Strany (tretí rozmer) 3D poľa zhrňujú všetky tieto údaje pre každý nastavený prúd I_1 . Rozloženie poľa ilustruje obr. 20.

nastavené Ib	Ube	0,6	0,7	0,7	0,6
	Ib	0,01	0,01	0,01	0,01
	Uce	0	6	12	18
	Ic	0	0,35	0,4	0,45

nastavené Ib + krok	Ube	0,62	0,74	0,71	0,66
	Ib	0,01	0,01	0,01	0,01
	Uce	0	5	11	17
	Ic	0	0,55	0,63	0,74

nastavené
U2

nastavené
U2 + krok

■ ■ ■

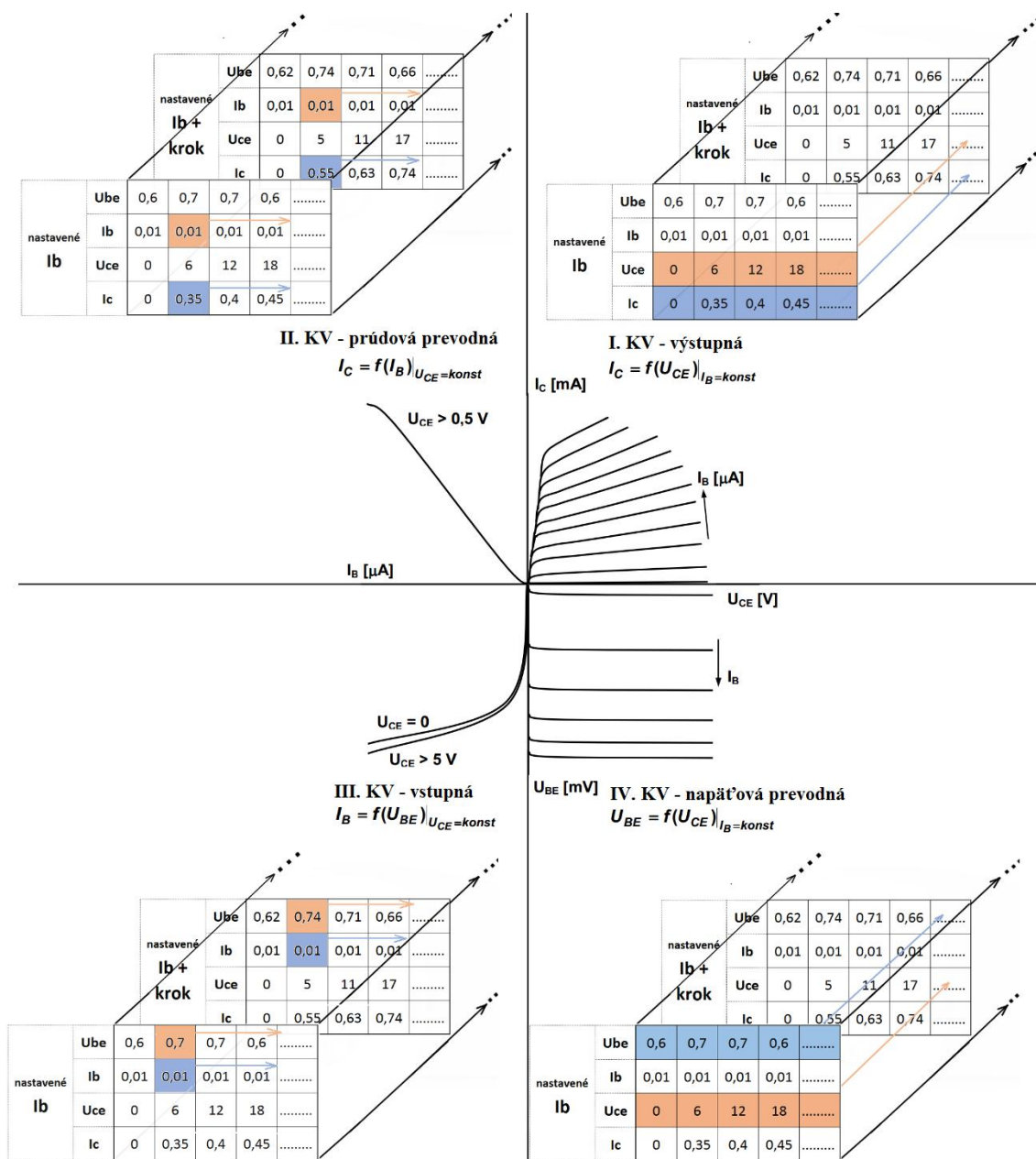
Obr. 20 : Reprezentácia dát v poli

3.1.3 Zobrazenie výsledkov

Z poľa nameraných hodnôt je potrebné vybrať vhodné vektory prislúchajúce daným charakteristikám a upraviť ich do tvaru ktorý je požadovaný indikátormi typu XY Graph. Na tento účel bolo vytvorené Sub-VI „BJT PLOT kvadranty.vi“ (obr. 22d). Na obr. 21 je znázornené 3D pole a jeho indexovanie pre každý kvadrant. Oranžovou farbou sú označené súradnice pre horizontálnu os a modrou prislúchajúce súradnice pre vertikálnu os, ktoré vytvoria jednu krivku. V smere šípok sa postupuje na vykreslenie ďalšej krivky.

Dôležitou súčasťou programu je export dát do tabuľkového súboru CSV. Do tabuľky nie je možné zapísať trojrozmerné pole, tak bolo vytvorené Sub-VI „3D meas data to 2D.vi“, ktoré skladá jednotlivé stránky poľa pod seba a ukladá do nového 2D poľa (obr. 22g). Zápis do súboru umožňuje „write 2d array to csv.vi“ (obr. 22h). Je možné exportovať tabuľku na jednoduchšie vykreslenie charakteristík napríklad v programe Microsoft Excel.

Konkrétnym zmeraným dátam a ich analýzou sa venuje kapitola 3.2.



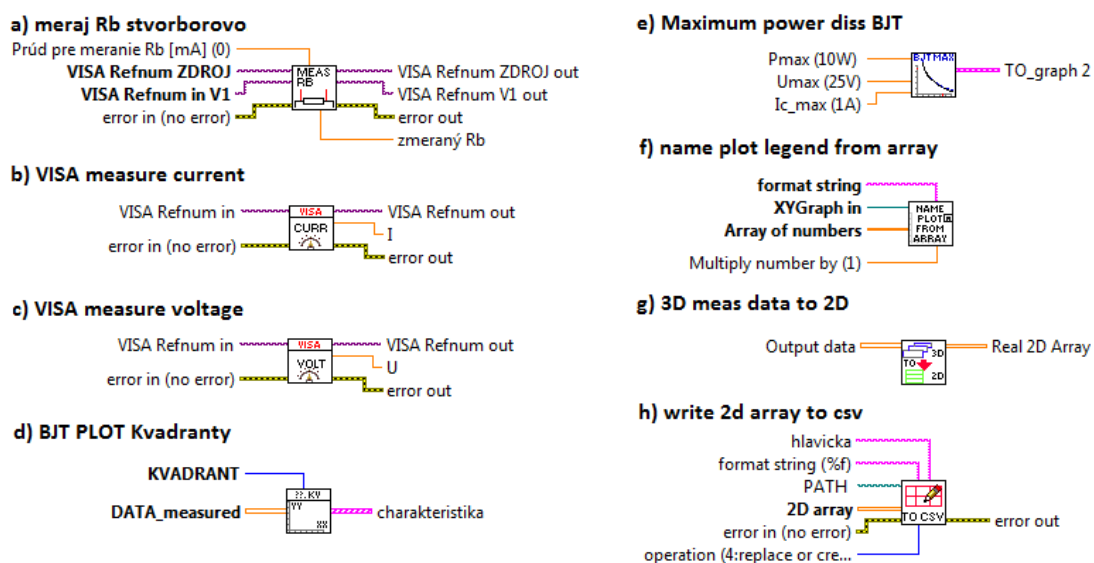
Obr. 21 : Výber bodov na vykreslenie jednotlivých kvadrantov - oranžová - os X, modrá - os Y, šípka - ďalšia charakteristika

3.1.4 Použité Sub-VI

Obr. 22 zobrazuje niektoré Sub-VI použité v celkovom blokovom diagrame. Jednotlivé zobrazené Sub-VI realizujú nasledujúce funkcie.

- Slúži na meranie odporu, pomocou nastavenia prúdového zdroja a merania rozdielu napätí. Pre presnejšie meranie je vhodné použiť väčší prúd, avšak v zapojení sa uzatvára cez tranzistor do zeme takže treba brať na úvahu maximálny básový prúd prípustný pre tranzistor.
- Zmeria prúd použitím zvoleného prístroja vstupom „VISA Refnum in“, odpoveď zariadenia prevádza na číslo a posiela na výstup.

- c) Rovnako ako b), s rozdielom že sa meria napätie.
- d) Vyberá z 3D poľa meraných dát (obr. 21) správne reprezentované dáta pre pripojenie indikátora „XY Graph“.
- e) Vytvára krivku maximálnej kolektorovej straty ktorá sa môže priradiť do grafu.
- f) Slúži na pomenovanie legendy grafu podľa privedeného poľa čísel. Umožňuje vložiť formátovací reťazec ktorým sa dá umiestniť číslo do reťazca znakov.
- g) Konvertuje 3D zmerané dáta na 2D pole pre zápis do súboru.
- h) Zapisuje 2D numerické pole do súboru typu „.csv“ na zvolenú cestu.



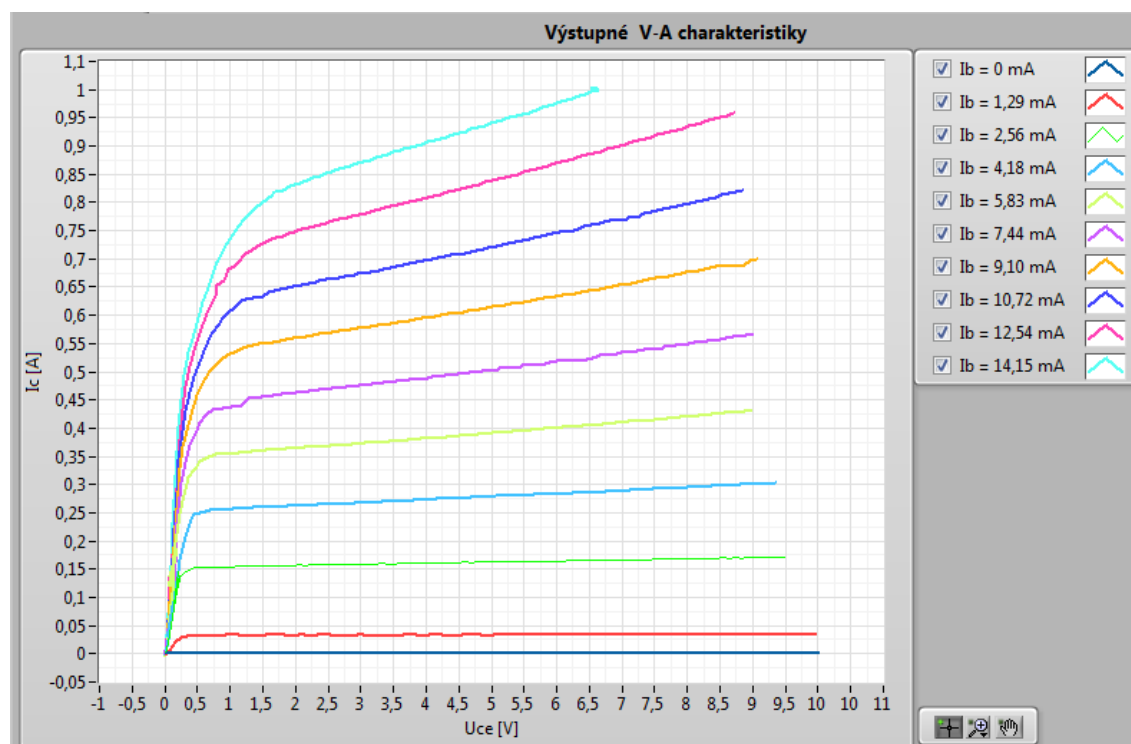
Obr. 22 : Niektoré použité Sub-VI v programe

3.2 Analýza zmeraných grafických závislostí

Pre zobrazenie presných kriviek je potrebné voliť menší krok, aby nebolo vidieť lineárnu interpoláciu medzi meranými bodmi. Nastavenie krokovania pri meraní bolo zvolené:

- Pre I. a IV. kvadrant:
 - U_2 od 0 do 10 V, počet krokov 101.
 - I_1 od 0 do 15 mA, počet krokov 10.
- Pre II. a III. kvadrant:
 - U_2 od 0 do 10 V, počet krokov 10.
 - I_1 od 0 do 15 mA, počet krokov 101.

I. Kvadrant zobrazuje graf $I_C=f(U_{CE})$ $|I_B=\text{konšt.}$, čo zodpovedá výstupným charakteristikám BJT (obr. 23).



Obr. 23 : Výstupné charakteristiky meraného BJT

Prúd I_C sa od určitého napätia zväčšuje lineárne vzhľadom na U_{CE} . Je to spôsobené rozširovaním depletičnej oblasti záverne polarizovaného PN priechodu BE s rastúcim napätím. Ideálny tranzistor má túto lineárnu časť konštantnú (nemění sa I_C). V reálnom tranzistore prúd s určitým gradientom rastie. Pri pomyselnom predĺžení týchto lineárnych častí charakteristík do záporných hodnôt by sa priamky pretli v jednom bode na osi U_{CE} . Absolútna hodnota tohto pomyselného bodu sa nazýva Earlyho napätie. Z grafu sa dajú pomerne jednoducho vybrať hodnoty a toto napätie spočítať.

Pre charakteristiku s konštantným prúdom 12,54 mA sú vybrané dva body: $[3,75 ; 0,8]$ a $[7 ; 0,9]$. Týmito bodmi je určená priamka daná rovnicami:

$$0,8 = 3,75 \cdot a + b, \quad (13)$$

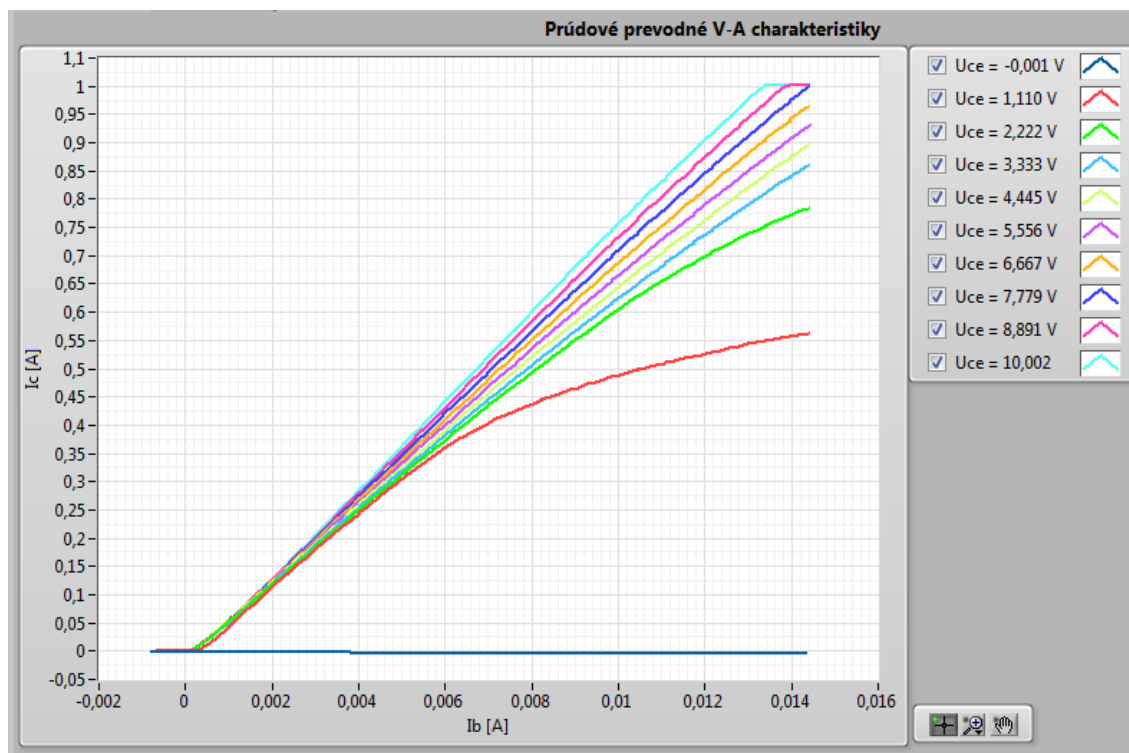
$$0,9 = 7 \cdot a + b, \quad (14)$$

ktorých riešením je rovnica priamky:

$$I_C = 0,03077 \cdot U_{CE} + 0,68. \quad (15)$$

Pri dosadení $I_C = 0$ je riešenie rovnice priesečník s osou U_{CE} . Absolútna hodnota tejto súradnice je hodnota Earlyho napätia $U_E = 22,1 \text{ V}$.

II. Kvadrant zobrazuje graf $I_C=f(I_B)$ | $U_{CE}=\text{konšt.}$, čo zodpovedá prúdovým prevodným charakteristikám BJT (obr. 24).



Obr. 24: Prúdové prevodné charakteristiky meraného BJT

Na krivkách je viditeľný pomer bázevého a kolektorového prúdu pri určitom kolektorovom napätí. Parameter h_{21E} dáva do pomeru tieto prúdy. Pri napätí U_{CE} nad 2 V sa mení prúdové zosilnenie len málo. Podľa grafu je približne rovné $h_{21E} \sim 66$.

Orezanie kriviek na hodnote 1 A nastalo z dôvodu dosiahnutia maximálneho prúdu ktorý dokáže zdroj Agilent E3631A z výstupu 25 V dodať.

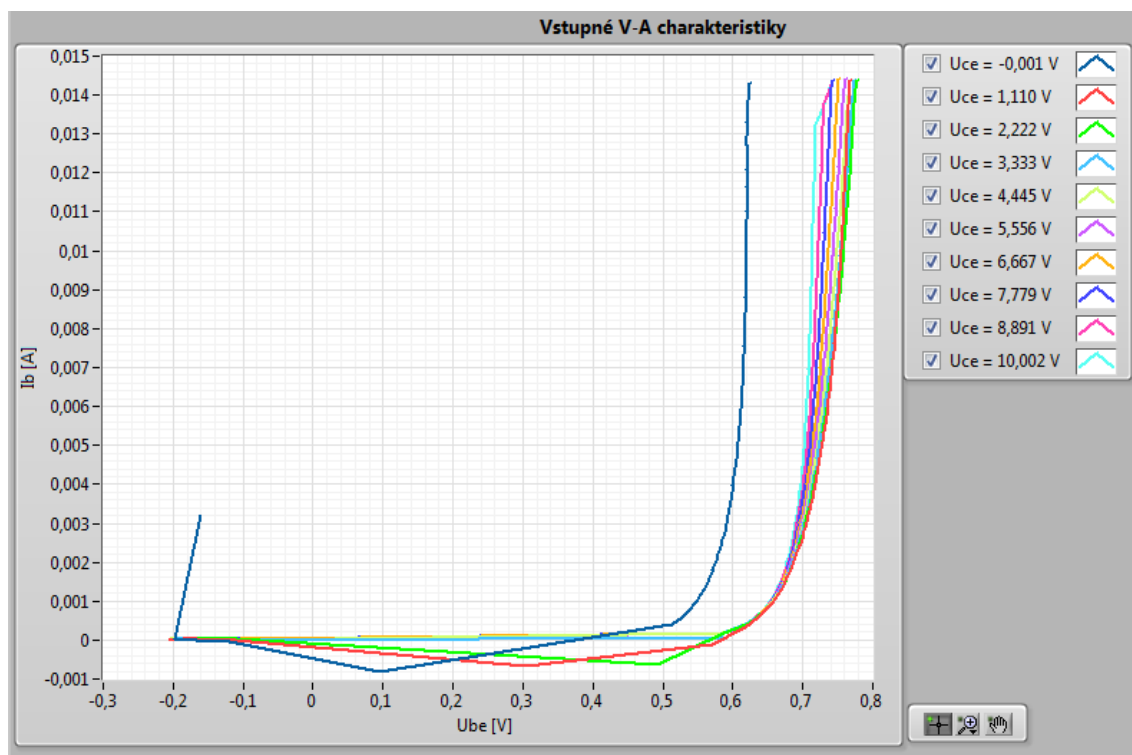
III. Kvadrant zobrazuje graf $I_B=f(U_{BE})$ | $U_{CE}=\text{konšt.}$, čo zodpovedá vstupným charakteristikám BJT (obr. 25).

Grafy vstupných charakteristík zobrazujú V-A charakteristiku diódy BE v priepustnom smere s prahovým napätím približne 0,6 V.

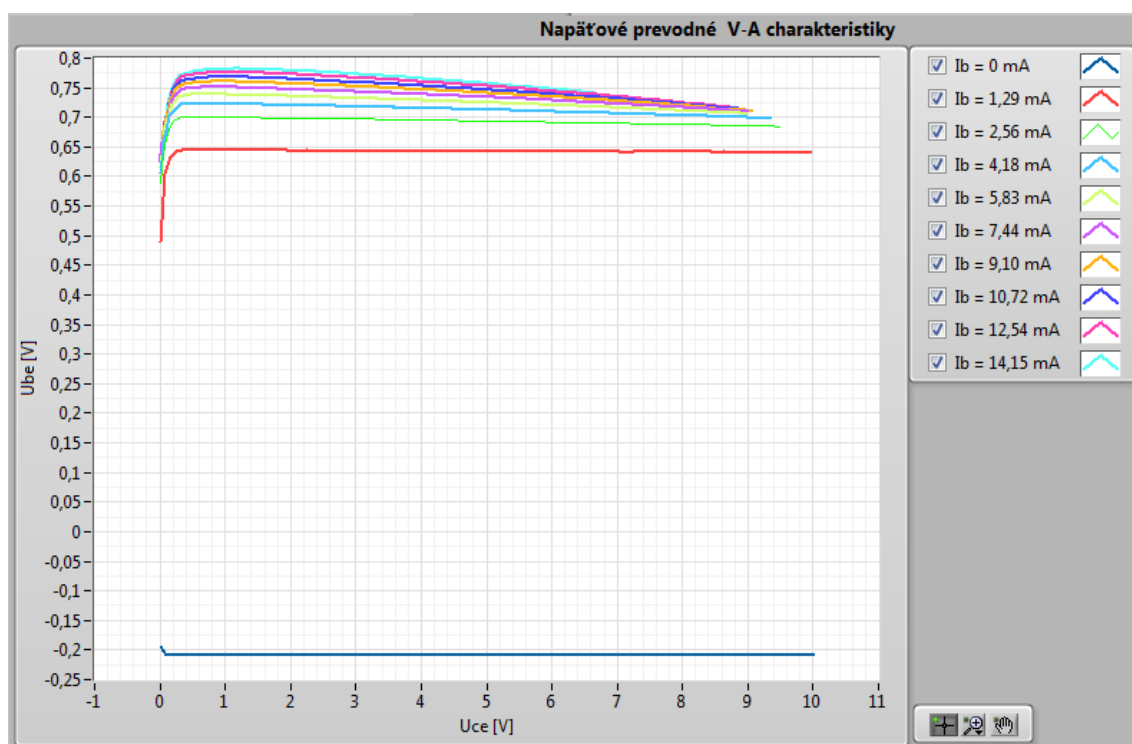
IV. Kvadrant zobrazuje graf $I_C=f(U_{CE})$ | $I_B=\text{konšt.}$, čo zodpovedá napäťovým prevodným charakteristikám BJT (obr. 26).

Krivky sú takmer konštantné, s miernym poklesom pri vyšších napätiach U_{CE} .

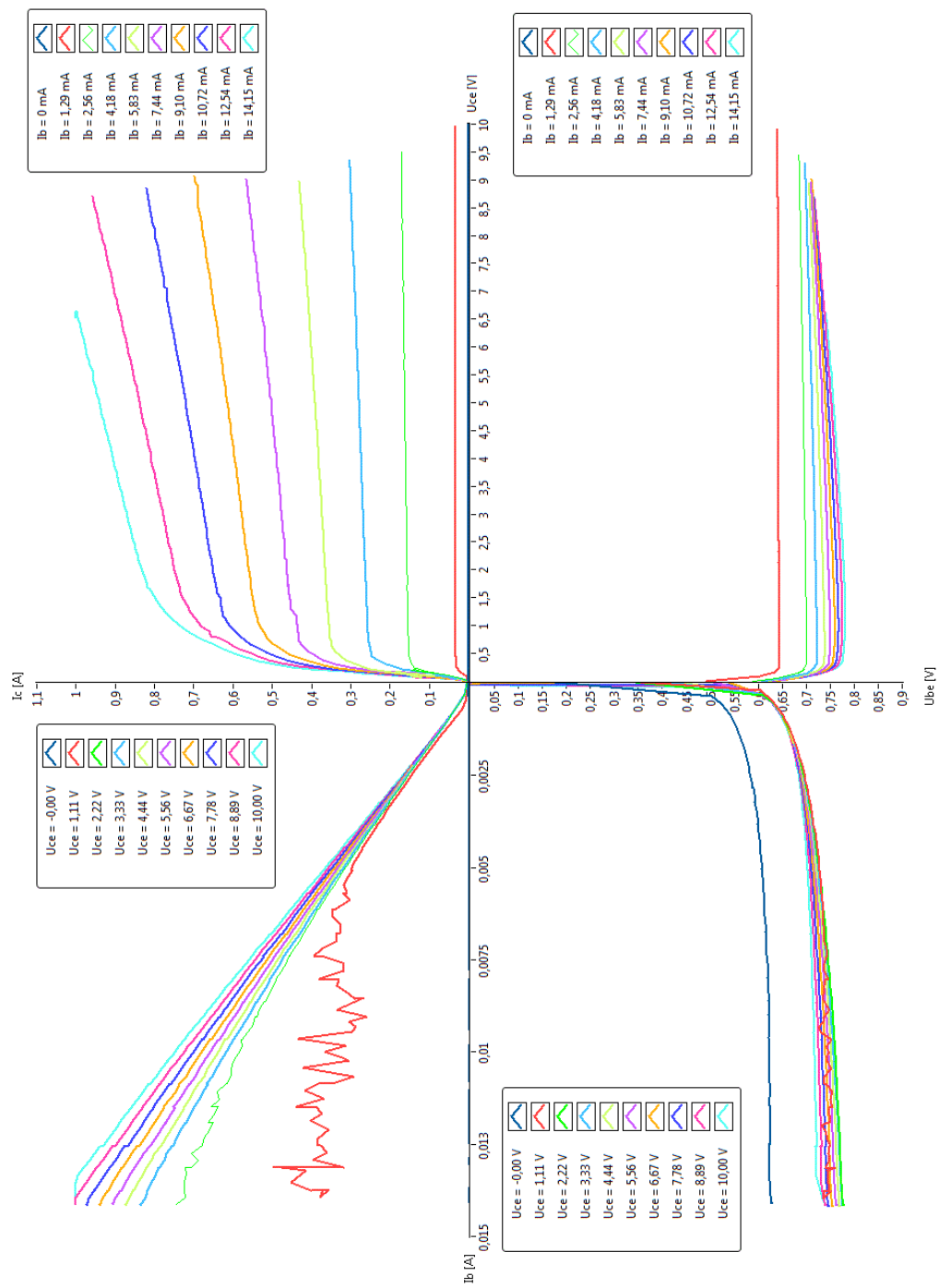
Obr. 27 spája štyri grafy do typického zobrazenia teoreticky rozobraného v kap. 1.1. Zmeny tvaru niektorých charakteristík od očakávaných boli pravdepodobne spôsobené nedokonalým elektrickým spojením zdroja do obvodu jeho kontaktami. Viditeľné hlavne v II. kvadrante na obr. 27.



Obr. 25 :Vstupné charakteristiky meraného BJT



Obr. 26 :Napäťové prevodné charakteristiky meraného BJT



Obr. 27: Zobrazenie štyroch kvadrantov charakteristik

4. Meranie dynamických vlastností

Schéma zapojenia prípravku je na obr. 10. Konkrétne merania vybrané pre bakalársku prácu popísané v kapitolách 4.3, 4.4 a 4.5 sú:

- Linearita (prevodná charakteristika);
- Celkové harmonické skreslenie + šum výstupného signálu – THD+N;
- Frekvenčná charakteristika;
- Prúdová prevodná charakteristika pre striedavý signál.

Pred samotným meraním spomenutých závislostí je nutné nastaviť jednosmerné napätia a prúdy v obvode. Na nastavenie pracovného bodu slúži okno, kde sa hneď po nastavení adries prístrojov a overení komunikácie s nimi zobrazí interaktívne prostredie na nastavenie týchto veličín.

Pracovný bod zvolený pri meraní dynamických vlastností v tejto bakalárskej práci bol: $U_{CE} = 14 \text{ V}$, $I_C = 245,1 \text{ mA}$ pri bazovom prúde $I_B = 5,2 \text{ mA}$.

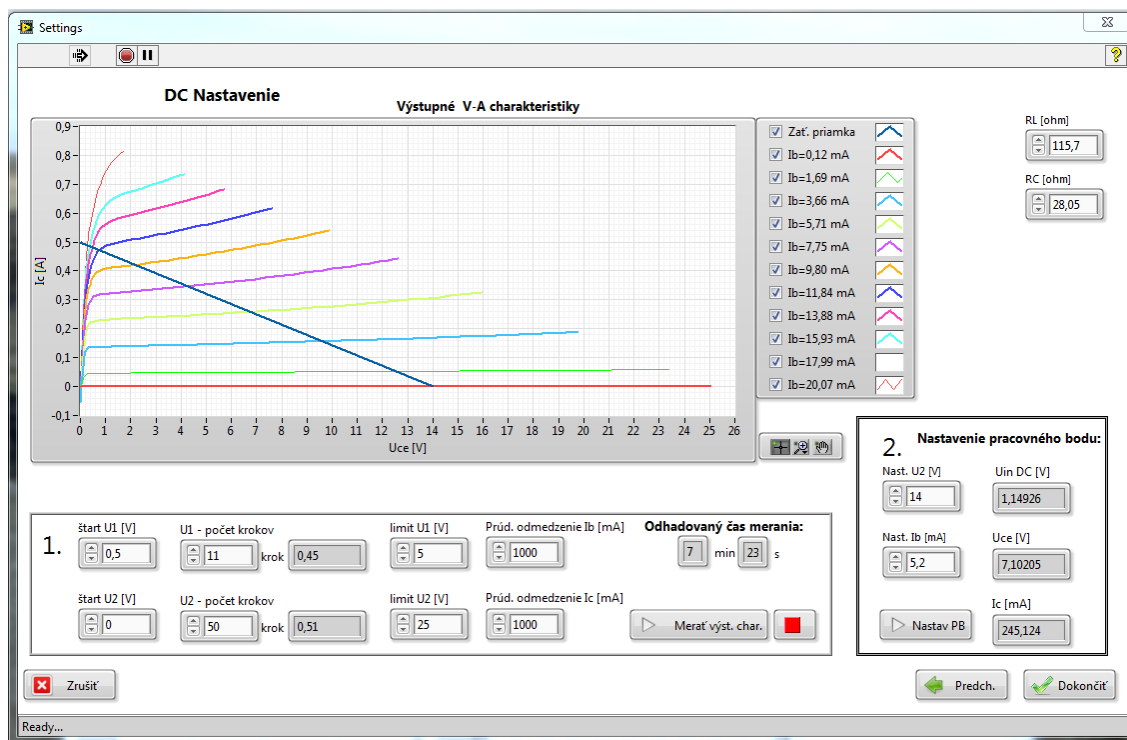
4.1 Vývoj programu

Program je implementovaný v dvoch paralelných „while“ slučkách. Bol použitý model master/slave [20], ktorý umožňuje efektívne využiť systémový čas. Hlavná slučka spracováva podnety od užívateľa. Obsahuje programovací prostriedok zvaný event štruktúra. Ak nastane udalosť (napr. kliknutie tlačidla na prednom paneli programu), štruktúra zachytí konkrétnu akciu a vykoná časť diagramu uzavretú v nej. Na identifikovanie konkrétnych akcií je použitá rada, do ktorej sa odosielaajú textové reťazce podľa požadovaných akcií užívateľa. V druhej slučke sa tieto reťazce z rady čítajú a vykonáva sa v nej adekvátne časť diagramu.

Zmerané dáta sa dajú exportovať z každého grafického indikátoru v kontextovom menu po kliknutí pravým tlačidlom myši ako MS Excel dokument, TXT súbor, alebo ako obrázok grafu.

4.2 Nastavenie merania

V hlavnom okne programu (obr. 30) je tlačidlo „DC nastavenie“, ktoré spustí nastavovacie okno. V prvom rade sa tu nastavujú VISA adresy prístrojov ktoré je potrebné použiť. Ako v predchádzajúcom programe, tiež sa dá overiť komunikácia. V druhom kroku sa objaví interaktívne prostredie na nastavenie pracovného bodu zosilňovača, čiže jednosmerných napätí a prúdov v obvode (obr. 28).



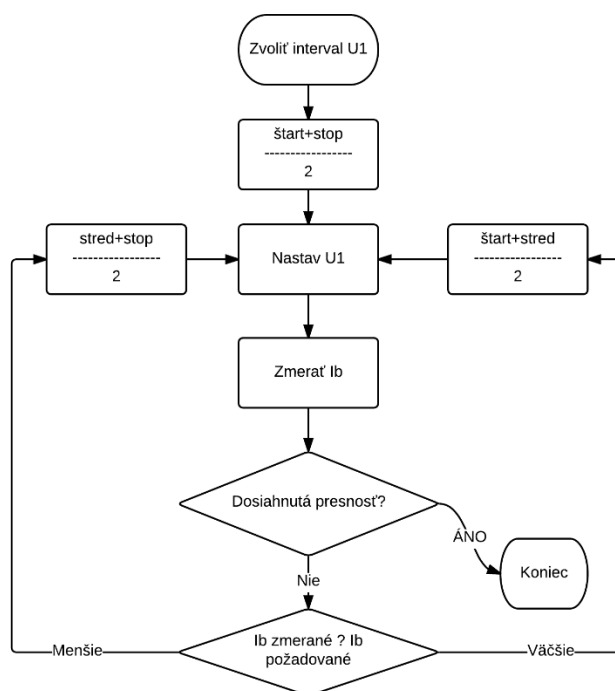
Obr. 28: Obrázovka DC nastavenia

Táto časť umožňuje automaticky zmerať výstupné charakteristiky bipolárneho tranzistora v zapojení. Zmenou nastavenia krokovania zdrojov sa automaticky prepočítava napäťový krok a odhadovaný čas merania. Spustením sa postupne nastavujú zdroje a odčítavajú napätia z prístrojov. Napätie U_{CE} bolo merané voltmetrom V_2 , prúd I_C bol vyčítaný zo zdroja U_2 . Prúd I_B bol vypočítaný z úbytku napätia na odpore R_L pomocou napätia zdroja U_1 a napätia na vstupe meraného voltmetrom V_1 . Odpor R_L reprezentuje odpor vinutia cievky L_1 , ktorý bol predom zmeraný. Tento odpor zostáva konštantný cez celý použiteľný rozsah jednosmerných prúdov I_B , takže sa dá použiť na ich detekciu. Výsledky merania sa vynesú do grafu na obrázovke.

Následne je možné nastaviť napätie zdroja U_2 v časti „2.“. Táto hodnota (spolu s kolektorovým odporom R_C) definuje zaťažovaciu priamku (viď. obr. 5), ktorá sa dá touto hodnotou posúvať po výslednom grafe. Pohľadom na jej umiestnenie vzhľadom na závislosť $I_C = f(U_{CE})$ pri rôznych I_B sa dá odhadnúť najlepšie umiestnenie pracovného bodu. Prislúchajúci bázový prúd sa vpíše do kolónky.

Nastavovanie prúdu nie je priame, zdroj nie je v režime konštantného prúdu, lebo na danom výstupe bolo možné nastaviť prúd najmenej v ráde jednotiek mA, čo by spôsobilo značnú nepresnosť. Preto je nastavované napätie zdroja U_1 dovtedy, až sa zmeraný prúd zhoduje s nastaveným s určitou presnosťou (zvolené na 5% z nastavenej hodnoty). Využíva sa tu algoritmus numerickej metódy polenia intervalov. Počiatočné medze sa určia z polí „start U_1 [V]“ a „limit U_1 [V]“. Nastaví sa napätie zo stredu tohto intervalu pri ktorom sa zmeria bázový prúd. Podľa hodnoty tohto prúdu v porovnaní s nastaveným sa použije za nový interval jedna z polovíc pôvodného. Postup sa opakuje až je dosiahnutá daná presnosť odhadu. Algoritmus dokumentuje vývojový diagram na obr. 29. Celé nastavenie sa vo väčšine prípadov podarí do 5 pokusov, čo zaberie 1 - 2 s.

Po nastavení sa vypíše napätie na kolektore ako aj kolektorový prúd.



Obr. 29: Vývojový diagram - polenie intervalov

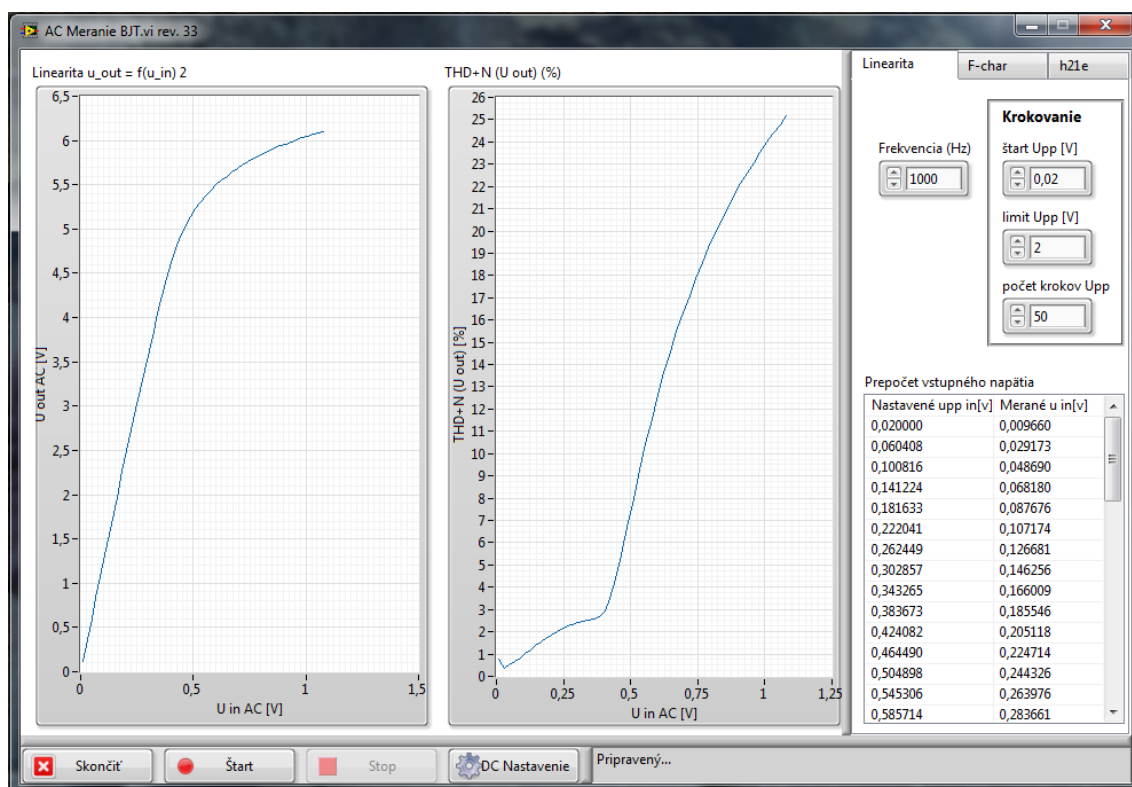
4.3 Linearita a THD+N

Teória k meraniu linearity je rozobraná v kap. 1.3. Prvý graf na obr. 30 zobrazuje graf prevodnej charakteristiky, ktorý sa používa na určenie linearity. Na osiach sú efektívne hodnoty vstupného a výstupného signálu. Ideálny zosilňovač má tento priebeh lineárny, čiže zosilňuje široký rozsah amplitúd vstupných napätí bez zmeny tvaru signálu. Reálne sa však pri meraní začala krivka grafu odchyľovať od lineárneho trendu, pretože výstupný signál bol orezaný. Linearita sa dá kvantifikovať činiteľom jednodedicibelovej kompresie – P1dB. Tento bod vyjadruje najväčšie vstupné napätie, ktoré je možné priviesť, aby odchýlka výstupného signálu od lineárnej extrapolovanej priamky pre malé signály nedosiahla viac ako 1 dB. Obr. 31 zobrazuje časť charakteristiky na určenie tohto parametru. Napätia sú vyjadrené v jednotkách dBV. Červená šípka ukazuje pokles o 1 dB, kde je vynesená súradnica vstupného signálu. Pre konkrétne meranie na prípravku to bolo približne -6,6 dBV, čo zodpovedá hodnote 0,47 V.

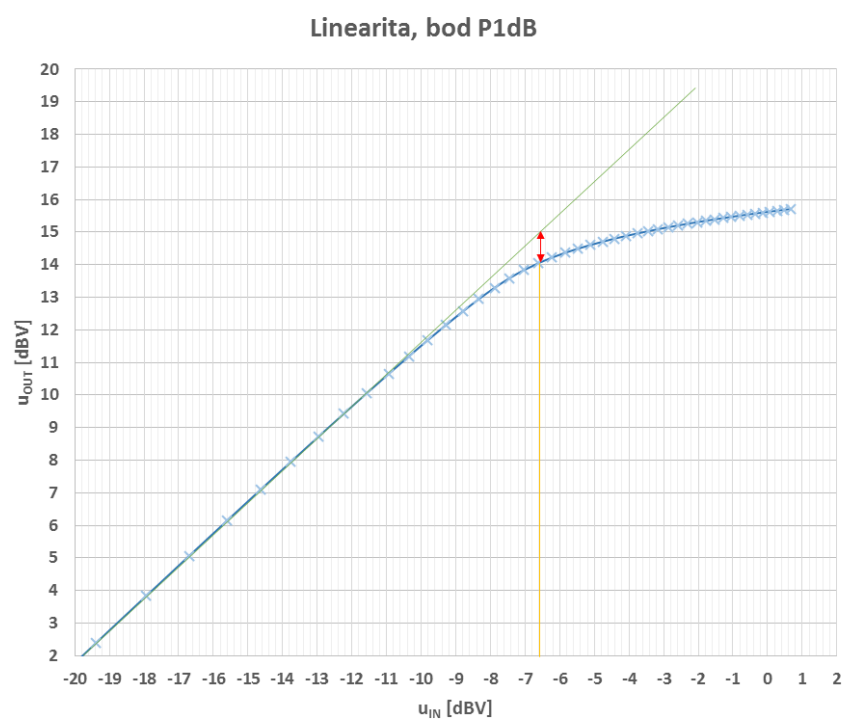
Druhý graf na obr. 30 zobrazuje skreslenie výstupného signálu pri meniaci sa amplitúde napätia na vstupe. Za povšimnutie stojí vzájomná súvislosť oboch grafov. V bode kde sa začne signál orezávať a linearita je porušená, tvar signálu sa mení a preto prudko narastá celkové harmonické skreslenie. V bode P1dB je už natoľko orezaný, že THD+N dosahuje hodnotu približne 5,6 %. Časový priebeh vstupného signálu zodpovedajúceho P1dB a výstupného signálu je na obr. 32.

Každý bod meranej charakteristiky prislúcha jednej hodnote vstupného napätia.

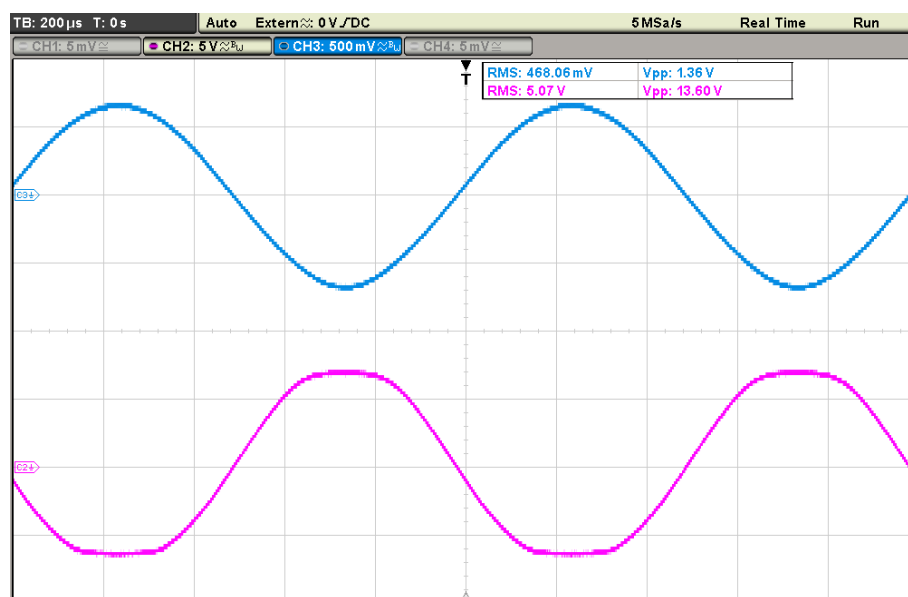
Generátor bol nastavovaný špičkovou hodnotu signálu (U_{pp}). Z dôvodu nerovnomerného zaťažovania generátora nemusí nastavená hodnota súhlasiť s napätím na výstupe. Preto je na obrazovke tiež zobrazená prevodná tabuľka nastavenej a meranej hodnoty vstupného napätia. Vstupné napätie bolo merané voltmetrom V_1 s nastaveným meraním efektívnej hodnoty. Efektívnu hodnotu výstupného napätia meral audio analyzátor UPV. Tento prístroj tiež vyhodnotil hodnotu THD+N v dB. Program prepočítava túto hodnotu do jednotiek %. Zmeranie jedného bodu charakteristík trvá asi 2 s.



Obr. 30: Meranie linearity + THD+N



Obr. 31: Určenie P1dB



Obr. 32: Časový priebeh vstupného signálu o veľkosti P1dB (modrá) a výstupného signálu (ružová) – snímok z osciloskopu

4.4 Frekvenčná charakteristika

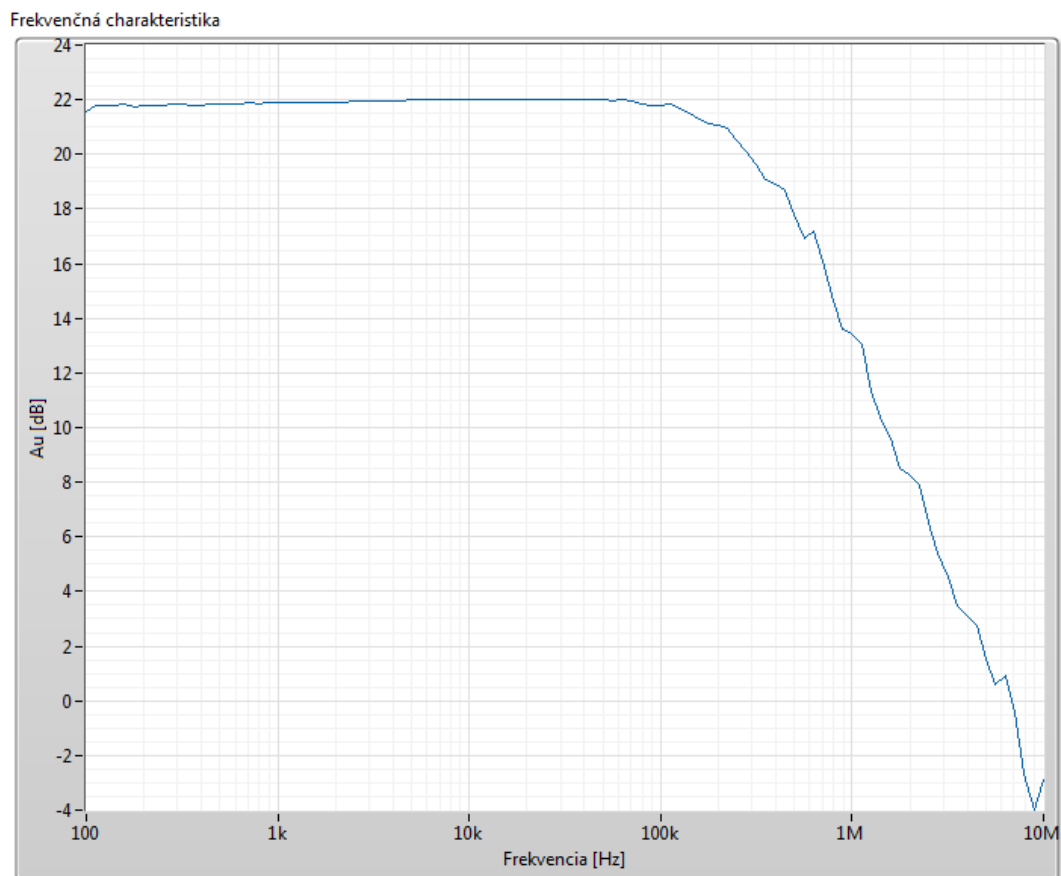
Frekvenčná charakteristika sleduje zmeny zosilnenia s meniacim sa kmitočtom vstupného signálu. Zosilnenie je vynesené na vertikálnej osi v jednotkách dB (16).

$$A_U = 20 * \log \left(\frac{U_{OUT} [V]}{U_{IN} [V]} \right) [dB] \quad (16)$$

Meranie sa nastavuje rozsahom frekvencií od - do, počtom krokov frekvencií na dekádu a špičkovou hodnotou vstupného napätia generátora U_{pp} [V] (dá sa vhodne zvoliť z merania linearity).

Z charakteristiky sa dá určiť medzná frekvencia, kde zosilnenie poklesne o 3 dB. V prípade zosilňovača v prípravku je to približne $f_0 = 347$ kHz. Z dôvodu väčšej plochy kolektora je medzná frekvencia pri výkonových tranzistoroch nižšia.

Vstupné a výstupné napätia boli merané na osciloskope, pretože voltmeter aj audio analyzátor mali obmedzené kmitočtové rozsahy. Pri každej nastavenej frekvencii generátora sa prestavila časová základňa osciloskopu. Následne sa nastavilo vertikálne zobrazenie na väčšiu hodnotu napätia pri ktorej sa zmeralo špičkové napätie signálu, podľa ktorého sa upravilo nastavenie vertikálnych zosilňovačov aby bol priebeh zobrazený na celom displeji a A/D prevodníky osciloskopu boli dostatočne vybudené. V tomto stave sa odčítala efektívna hodnota napätia. Proces prebiehal rovnako aj s druhým kanálom. Hodnoty sú v programe prepočítané na zosilnenie v dB. Jeden bod charakteristiky sa meria približne 10 s.



Obr. 33: Frekvenčná charakteristika

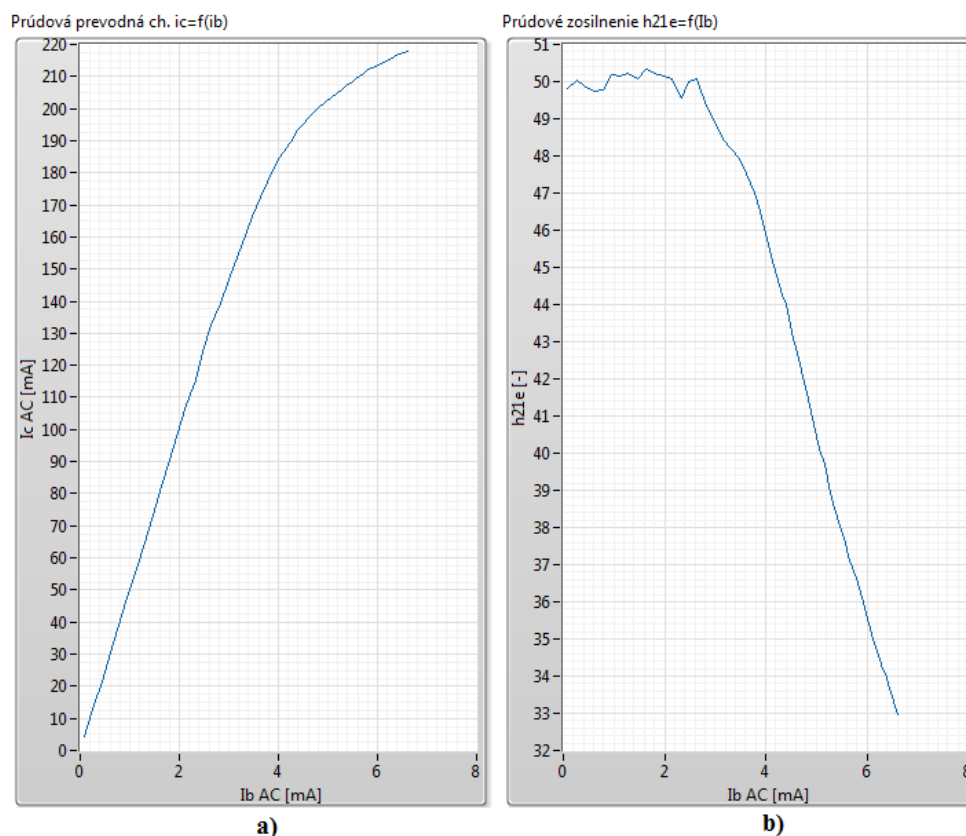
4.5 Prúdová prevodná charakteristika

Krivka na grafe zobrazenom na obr. 34a vyjadruje vzťah striedavej zložky kolektorového prúdu ku báзовému v zapojení zosilňovača s bipolárnym tranzistorom. Varianta pre jednosmerné prúdy bola zameraná v rámci statických charakteristík (obr. 24).

Charakteristika opäť nie je ideálne lineárna z dôvodu obmedzenia dynamického rozsahu zosilňovača. Smernica lineárnej časti je rovná koeficientu h_{21e} , tiež označovaného ako $\Delta\beta$ (2). Druhý graf (obr. 34b) zobrazuje priebeh koeficientu h_{21e} v závislosti na báзовom prúde. Pri báзовých prúdoch zodpovedajúcim lineárnej časti prvého grafu by mal byť konštantný a vo vyšších hodnotách I_b klesať. Vplyvom chýb merania a podielu meraných prúdov nemá priebeh ideálny tvar. Prúdové zosilnenie pre striedavý signál o frekvencii 1 kHz sa bolo zmerané v hodnotách $h_{21e} \sim 50$.

Nastavenie merania spočíva v určení začiatkovej a koncovej hodnoty U_{pp} [V], počtu bodov na meranie a zadání frekvencie vstupného signálu. Sú tu tiež polia na nastavenie odporu R_B a R_C pomocou ktorých sa určujú hodnoty prúdov. Na schéme zapojenia (obr. 10) je vidieť, že tri kanály osciloskopu sú pripojené do obvodu. Automatické nastavenie kanálov prebieha rovnako pri meraní frekvenčnej charakteristiky (kap. 4.4). Kolektorový prúd je určený napätím na kolektore vydeleným odporom R_C . Druhý vývod odporu je uzemnený cez zdroj U_2 . Toto uzemnenie je dostatočné, lebo zdroj má malý výstupný odpor. Báзовý prúd je určený z rozdielu signálov privedeného na kanály

osciloskopu: CH3 - CH4. Odčítanie signálov je realizované pomocou matematických funkcií osciloskopu. Efektívna hodnota tohto napätia je podelená hodnotou odporu R_B , čím sa dostáva efektívna hodnota prúdu I_B . Zmeranie jedného bodu charakteristiky trvá približne 13 s. Čas merania sa predlžil kvôli nutnosti viackrát prestavovať vertikálne zosilňovače osciloskopu.



Obr. 34: Prúdová prevodná charakteristika pre striedavý signál

Záver

V rámci bakalárskej práce bol vytvorený univerzálny program na meranie charakteristík bipolárnych tranzistorov. Program umožňuje interaktívne overiť komunikáciu s prístrojmi, nastaviť meraný rozsah napätí a prúdov. Disponuje funkciou zmerania bázevého odporu pred meraním, ktorý je použitý na snímanie bázevého prúdu. Po automatickom meraní, pri ktorom počítač komunikuje so zdrojom a multimetrami sa zobrazia prehľadné grafy zobrazujúce výsledky merania. Dáta je možné uložiť do súboru.

Druhý program je zameraný na automatické meranie dynamických vlastností tranzistorového zosilňovača. Za týmto účelom boli pridané prístroje ako generátor, osciloskop a audio analyzátor. Pre toto meranie bol v rámci bakalárskej práce navrhnutý a vyrobený prípravok. Program bol vyvíjaný pomocou tohto prípravku a bola ním aj overená funkčnosť celého programu na demonštratívnych automatizovaných meraniach.

Tento program vytvára veľký priestor na experimentovanie so zapojeniami zosilňovačov. V relatívne krátkom čase je možné vedieť určité vlastnosti aj zložitejšieho zapojenia zosilňovača. Pri zmene hodnôt súčiastok, napájacích napätí, výrobcov súčiastok, atď. je možné pozorovať zmeny vlastností a tak smerovať aj vývoj zložitejších zapojení správnym smerom. Oba vytvorené programy aj s ukážkou nameraných dát sú uložené v elektronickej prílohe.

V rámci bakalárskej práce som vytvoril 3 rôzne laboratórne úlohy na podporu výuky predmetu MREM (Radioelektronická měření) spolu so zadaniami a prehľadným manuálom na vypracovanie. Návod ako aj vzorové riešenia obsahujúce vytvorené programy sú tiež v elektronickej prílohe.

Literatúra

- [1] WHITAKER, Jerry C. *The resource handbook of electronics*. Boca Raton: CRC Press, 2000, xvii, 491 s. ISBN 08-493-8353-6
- [2] *Bipolar junction transistors* [online]. 2014 [cit. 2014-11-21]. Dostupné z: http://www.allaboutcircuits.com/vol_3/chpt_2/8.html
- [3] *Principles of Semiconductor Devices* [online]. 2011 [cit. 2014-11-21]. Dostupné z: http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter5/ch5_2.htm
- [4] KANANIAN, Siavash. *Physics of Bipolar Junction Transistors* [online]. [cit. 2014-11-21]. Dostupné z: <http://ee.sharif.edu/~analogcircuit/notes/Physics%20of%20Bipolar%20Junction%20Transistors.pdf>
- [5] SYROVÁTKO, Milan. *Zapojení s polovodičovými součástkami*. 3. uprav. a dop. vyd. Praha: SNTL, 1987, 264 s.
- [6] *Elektronické součástky*. 1. vyd. Brno: VUTUM, 2005, 56 s. ISBN 80-214-2627-6.
- [7] BIOLEK, Dalibor. *Analogové elektronické obvody: počítačová a laboratorní cvičení*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003, 56 s. ISBN 80-214-2490-7.
- [8] BOUŠEK, J. *Modely bipolárního tranzistoru* [online]. [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bousek/eso/tabL7.pdf>
- [9] NEAMEN, Donald A. *Electronic circuit analysis and design*. Chicago: Irwin, c1996, xxvii, 1128 p. ISBN 02-561-1919-8.
- [10] CENTELLAX, Inc. *AN30: Basic Total Harmonic Distortion (THD) Measurement* [online]. 2014 [cit. 2014-11-22]. Dostupné z: <http://www.centellax.com/sites/centellax.com/files/AN30.pdf>
- [11] METZLER, Bob. *AUDIO PRECISION. Audio Measurement Handbook* [online]. 2. vyd. 2005 [cit. 2014-11-22]. Dostupné z: <http://www.ap.com/download/file/24>
- [12] *KU612 datasheet* [online]. [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: http://alltransistors.com/pdfview.php?doc=kd366-a-b_kd367-a-b_kc510_ku601_ku602_ku605_ku606_ku607_ku608_ku611_ku612_sul160_sul161_sul167_sul169.pdf&dire=tesla
- [13] *Agilent E3631A* [online]. [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: <http://www.keysight.com/en/pd-836433-pn-E3631A/80w-triple-output-power-supply-6v-5a-25v-1a?cc=CZ&lc=eng>
- [14] *Agilent 34410A* [online]. [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: <http://www.keysight.com/en/pd-692834-pn-34410A/digital-multimeter-6-digit-high-performance?cc=CZ&lc=eng>
- [15] *R&S®RTM Digital Oscilloscope Specifications* [online]. 2012 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/RTM_dat-sw_en.pdf
- [16] *33220A Function / Arbitrary Waveform Generator* [online]. 2014 [cit. 2014-12-11]. Dostupné z: <http://www.keysight.com/en/pd-127539-pn-33220A/function-arbitrary-waveform-generator-20-mhz?cc=CZ&lc=eng>
- [17] *R&S®UPV Audio Analyzer Specifications* [online]. 2013 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z:

http://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/UPV_dat_sw_en_0758-1306-22_v0400.pdf

- [18] *Amplifier Classes* [online]. 2015 [cit. 2015-04-19]. Dostupné z: <http://www.electronics-tutorials.ws/amplifier/amplifier-classes.html>
- [19] *Měření polovodičových součástek* [online]. 2013 [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~drinovsky/?download=MREM_2014_L_VEE_01.pdf
- [20] NATIONAL INSTRUMENTS. *Application Design Patterns: Master/Slave* [online]. 2006 [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/3022/en/>

Zoznam veličín, symbolov a skratiek

AC	alternating current (striedavý prúd)
BJT	bipolar junction transistor (Bipolárny tranzistor)
DAQ	data ascquisition
dB	decibel
DC	direct current (jednosmerný prúd)
DUT	device under test (testované zariadenie)
GPIB	zbernica na pripojenie prístrojov (General Purpose Interface Bus)
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LAN	Local Area Network
PXI	rozšírená zbernica PCI (extended PCI)
Q	pracovný bod tranzistora – nastavené jednosmerné pomery v obvode
SB	spoločná báza
SC	spoločný kolektor
SE	spoločný emitor
Sub-VI	VI umiestnené v hlavnom VI (podprogram)
THD	total harmonic distortion (celkové harmonické skreslenie)
THD+N	total harmonic distortion + noise (celkové harmonické skreslenie + šum)
VI	virtuálny prístroj (virtual instriment), súbor LabVIEW

Prílohy

Zoznam príloh:

- A. Laboratórna úloha č.1 –
Meranie linearity a harmonického skreslenia zosilňovača
- B. Laboratórna úloha č.2 –
Meranie frekvenčnej charakteristiky zosilňovača
- C. Laboratórna úloha č.3 –
Meranie striedavej prúdovej prevodnej charakteristiky

A. Laboratórna úloha č.1

Meranie linearity a harmonického skreslenia zosilňovača

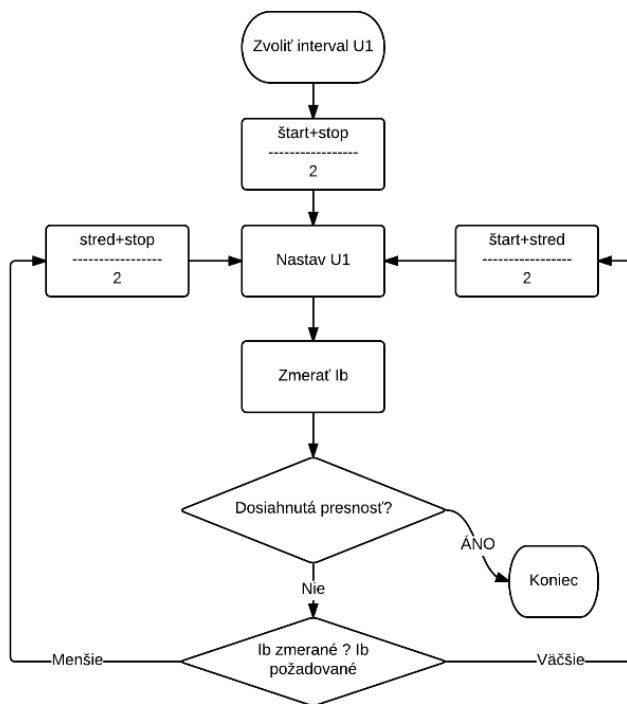
Zadanie laboratórnej úlohy:

1. Pripojte, programovo identifikujte a resetujte všetky prístroje
2. Vytvorte program, ktorý nastaví pracovný bod pomocou vstupných parametrov U_2 a I_b . Nastavte napätie U_2 . Napätie U_1 nastavujte použitím numerickej metódy polenia intervalov až kým nedosiahnete presnosť zmeraného I_b 5%.
3. Použitím generátora, voltmetra V_1 a UPV analyzátora zmerajte linearitu zosilňovača $U_{out}=f(U_{in})$ a tiež závislosť skreslenia výstupného signálu ($THD+N$) na vstupnom signáli $THD+N(U_{out})=f(U_{in})$.

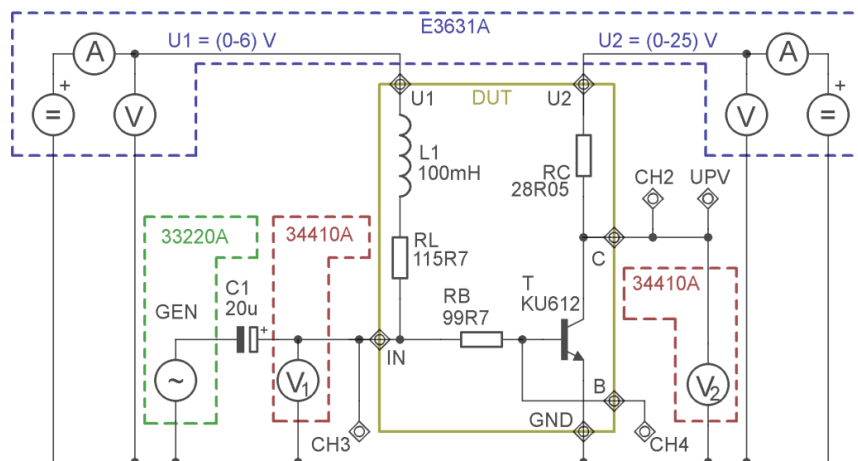
Teoretický úvod:

Prúd na zdroji HP E3631A je možné nastaviť v Ampéroch na 3 desatinné miesta. Ak je potrebné nastavovať jednotky mA, je nastavenie v prúdovom režime nepresné. Preto bude postupne nastavované napätie U_1 , pričom odhad sa bude spresňovať každou iteráciou až po dosiahnutie dostatočnej presnosti. Postup ilustruje blokový diagram na obr. 1.

Schéma zapojenia prípravku je zobrazená na obr. 2.



Obr. 1: Polenie intervalov - blokový diagram

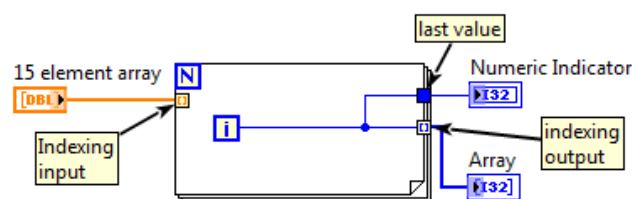


Obr. 2: Schéma zapojenia prípravku

Tunely v LabVIEW:

Pri použití štruktúr (slučky, case structure, ...) je možné privádzať a odvádzať signály rôznymi spôsobmi. Na hraniciach sú tunely, ktoré plnia rozdielne funkcie.

Pri „for“ slučke je možné nastaviť 3 typy tunelov (obr. 3)



Obr. 3 Ukážka tunelov vo for slučke

- *Indexing input* – Ak nie je privedená hodnota do *count* terminálu (N), slučka sa môže indexovať privedeným poľom. V každej iterácii je dostupný jeden prvok poľa. Počet iterácií závisí na dĺžke privedeného vektora.
- *Last value* – Cez tunel prejde posledná hodnota po skončení iterovania slučky. Ak má vektor 15 hodnôt tak na indikátore bude číslo 14.
- *Indexing output* – V každej iterácii ukladá hodnoty do vektora. Na indikátore bude pole hodnôt 0 až 14.

„Case structure“ sa používa pri vytváraní podmienok (ako „if“ v textových jazykoch) a vyskytujú sa tu 3 druhy tunelov.

- *tunnel output* – výstup je pripojený vo všetkých prípadoch (case)

- *unwired output* – minimálne v jednom prípade nie je výstup pripojený – generuje error, program sa nedá spustiť

- *use default output* – pravým tlačidlom sa dá zvoliť použitie predvolenej hodnoty keď je tunel z „vnútra“ nepripojený.

Postup merania:

1) Identifikácia, reset zariadení

Pomocou príkazu ***IDN?** a funkciami **VISA Write**, **VISA Read** (na vstup byte count prived'te konštantu **512**) overte v prostredí LabVIEW komunikáciu s prístrojmi pripojených do zbernice GPIB ktoré budú potrebné pre meranie:

- DC zdroj: HP E3631A;
- Generátor: Agilent 33220A;
- Voltmeter V1, V2: Agilent 34410A;
- Audio analyzátor: R&S UPV.

Identifikáciu zariadení (odpoveď) vypíšte na predný panel do indikátora.

Po overení komunikácie zariadenia zresetujte pomocou príkazu ***RST**. Po zresetovaní zariadení zaveďte oneskorenie 2 s (tab. 3).

2) Nastavenie pracovného bodu

Správnym príkazom pre prístroj nastavte hodnotu výstupného napätia výstupu P25V na napätie $U_2 = 12\text{V}$.

Bázový prúd $I_b = 4\text{mA}$, ktorý dosiahnete nastavením správneho U_1 v rozsahu (0 – 3 V)

Na zistenie správneho napätia U_1 (výstup zdroja P6V) pre zadaný bázový prúd využite algoritmus polenia intervalov, ktorý je rozobratý v teoretickom úvode. Pre zaistenie iterácii využite **while** slučku ktorá bude končiť keď sa dosiahne presnosť nastaveného prúdu I_b na menej ako 5% z požadovaného prúdu. Slučka bude mať obmedzený počet iterácii na 15 (číslo iterácie zmenšené o 1 je vždy v iteračnom termináli **i**). Ak sa nepodari dosiahnuť presnosť v 15 iteráciách, program notifikuje užívateľa chybovou hláškou (použite **One Button Dialog**). Počiatočný interval voľte (0 – 3 V). Pri vypracovaní bude potrebné použiť aj **Case structure** a **Shift registre**. Na konverziu odpovede v stringu na číslo použite **Scan From String**. Opačne funguje funkcia **Format Into String** (pre nastavenie zdroja). Prehľad funkcií je v tab. 3.

Po nastavení vypíšte na indikátoroch:

- Napätie U_{CE} (z voltmetru V_2);
- Prúd I_C (zo zdroja);
- Skutočný prúd I_b .

Hodnotu bázového prúdu získajte z úbytku napätia medzi nastaveným U_1 a napätím na voltmetri V_1 . Odpor medzi týmito dvoma bodmi je **115,7 Ω** (obr. 2).

Časový odstup medzi nastavením zdroja a meraním napätia na voltmetri musí byť minimálne 300 ms.

Všetky potrebné príkazy pre ovládanie prístrojov v tejto časti úlohy sú v tab. 1 a v tab. 2.



Tab. 1: Príkazy pre DC zdroj HP E3631A

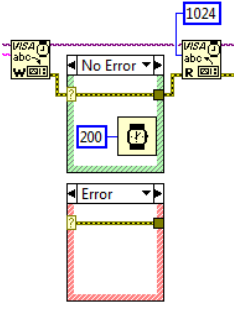
INST:SEL P25V	Zvolenie ovládania výstupu 25V
INST:SEL P6V	Zvolenie ovládania výstupu 6V
CURR 1A	Nastavenie prúdu (príp. prúdového limitu) na 1 A
VOLT 5.56V	Nastavenie napätia (príp. napäťového limitu) na 5.56 V
OUTP ON	Zopnutie výstupu
OUTP OFF	Vypnutie výstupu

Tab. 2: Príkazy na ovládanie DC zdroja HP 6361A a voltmetrov typu 34410A

MEAS:VOLT?	Dopýtanie sa po DC napätí
MEAS:CURR?	Dopýtanie sa po prúde

Tab. 3: Funkcie LabVIEW, ktoré je možné pri vypracovaní použiť

While loop	Slučka iteruje až pokým sa do „conditional terminal“ -  privedie log. 1
For loop	Slučka iteruje N krát. Počet iterácií je daný číslom privedeným do count terminálu -  , alebo privedeným poľom.
Case structure	Využitie pri podmienkach (if)
VISA funkcie (Open, Write, Read, Close)	Obsluhovanie komunikácie s prístrojmi
Scan From String	Konverzia odpovede meranej hodnoty (prijatý string) na číslo formátu double. Formátovací reťazec na správne prečítanie je „%. ; %f“.
Format Into String	Konverzia čísla double na string pre poslanie príkazu do prístroja. Zástupné znaky pre číslo sú „%. ; %f“ alebo „%. ; %e“ v exponenciálnom formáte (hlavne pre frekvencie).
Wait (ms)	Časové oneskorenie (použiť na ustálenie po nastavení, resete)
Build Array	Vytváranie, dopĺňanie polí
One Button Dialog	Notifikácia užívateľa malým oknom s jedným tlačidlom

Merge Errors	Spája viac vetiev error clusteru do jedného. Typicky po otvorení, identifikácii, resete zariadení.
<p>Oneskorenie pomocou Case structure a Wait (ms)</p> 	<p>LabVIEW funguje na princípe dataflow. Každý blok (node) sa spustí až keď má hodnotu na všetkých pripojených vstupoch.</p> <p>Pri ovládaní prístrojov často treba zaviesť časové oneskorenie (po resete, po nastavení hodnoty, atď..). Na tento účel je vhodné použiť error cluster (zelená prerušovaná čiara) privedený do case structure. Ak v priebehu komunikácie nenastala nijaká chyba vykoná sa stav „No Error“ kde sa spustí funkcia Wait (ms), čo oneskorí tok dát o zadanú hodnotu času v ms.</p> <p>V prípade chyby (napr. nezadaná adresa) je oneskorenie zbytočné, pretože ani samotné funkcie LabVIEW sa nevykonajú, iba preposielajú chybu.</p>

3) Meranie linearity, *THD+N*

Na meranie linearity a *THD+N* bude potrebné použiť generátor, UPV analyzátor a voltmeter V_1 .

3.1) Vytvorenie testovacieho vektora

Každý meraný bod charakteristiky zodpovedá jednému vstupnému AC napätiu nastavenému na generátore. Vytvorte si vektor hodnôt napätí U_{pp} , ktorými budete nastavovať generátor v rozmedzí (0,02 – 2) V s dostatočne malým krokom (pre začiatok na 10 hodnôt). Použite **for** slučku a numerické funkcie (+,-,*,/). Konverzia celočíselného formátu (z iteračného terminálu) sa dá vykonať použitím funkcie **To Double Precision Float**. Vytvorte ovládacie prvky na zvolenie hodnôt napätí od – do a počet krokov (hodnôt vektora). Vektor si zobrazte na indikátore a overte.

3.2) Meranie linearity, *THD+N*

Pred časťou programu, kde bude meranie prebiehať v iteráciách v slučke treba nastaviť potrebné funkcie prístrojov (zbytočné nastavovať v každej iterácii). Na nastavenie generátora použite príkazy z tab. 4. Príkazy môžete zapísať pomocou jednej funkcie **VISA Write** oddelené novým riadkom alebo bodkočiarku (;).

Tab. 4: Príkazy potrebné na obsluhovanie generátora 33220A

FUNC SIN	Nastavenie priebehu funkcie - sínus
VOLT:UNIT VPP	Jednotka nastavení napätia – hodnota špička-špička
VOLT 1.25V	Nastavenie napätia $U_{pp} = 1,25$ V. Príkaz podporuje aj jednotky (mV).
FREQ 1kHz	Nastavenie frekvencie na 1 kHz
VOLT:OFFS 0 V	Nastavenie offsetu na 0 V

OUTP ON	Zopnutie výstupu
OUTP OFF	Vypnutie výstupu

Na nastavenie analyzátora UPV použite sekvenciou nasledujúcich príkazov, ktoré povolia daný kanál, nastaví meranie $THD+N$ a efektívnej hodnoty napätia. Po tomto nastavení naprogramujte 1 s oneskorenie (prístroj musí pozapínať dané obvody).

```
INPut:CHAN CH1
SENSe:FUNCTion THDN
SENSe6:FUNCTion LRMS
SENSe7:FUNCTion ON
*TRG
```

Neskôr teda dopýtaním sa na `SENSe` dostaneme hodnotu $THD+N$ a dopýtaním na `SENSe6` efektívnu hodnotu napätia.

Meranie zostavte tak, aby sa každý meraný bod zobrazil do grafu už pri meraní.

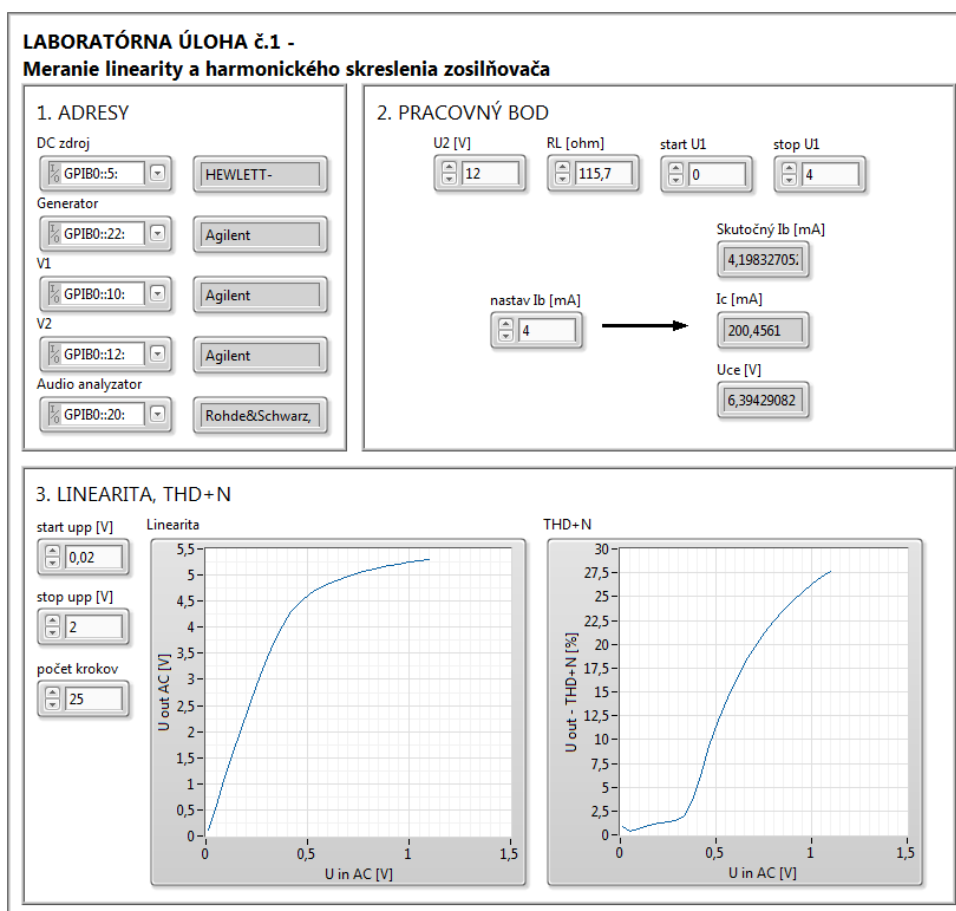
Pre každý bod charakteristík (v jednej iterácii) je potrebné:

- Nastaviť špičkové napätie generátora (z hodnoty pripraveného vektora)
 - Iba jedným príkazom z tab. 4 (ostatné je nastavené pred slučkou) po ktorom treba zaviesť dostatočné oneskorenie
- Zmerať efektívnu hodnotu napätia na vstupe pomocou voltmetru V_1
 - Príkaz pre voltmeter je: **MEAS:AC?**
- Pridať U_{IN} do poľa
 - Pole bude možné v slučke meniť (treba použiť **Shift register**) a pridávať hodnotu do poľa pomocou **Build Array** (pravým tl. Concatenate inputs)
 - Nezabudnite pred slučkou inicializovať Shift register prázdnu konštantou poľa double
- Zmerať efektívnu hodnotu napätia na výstupe pomocou analyzátora UPV
 - Príkaz ***TRG;SENSE6:DATA?**
- Pridať U_{OUT} do poľa (vid' 3.)
- Zmerať hodnotu $THD+N$ výstupného signálu pomocou analyzátora UPV
 - Príkaz ***TRG;SENSE:DATA?**
- Prepočítať $THD+N$ z dB na %
 - Bude potrebná funkcia umocnenia 10^x v LabVIEW: **Power of 10** a iné
- Pridať $THD+N$ do poľa (vid' 3.)

9. Aktualizovať údaje do grafov

- Linearita - $U_{out}=f(U_{in})$
- Celkové harmonické skreslenie - $THD+N(U_{out})=f(U_{in})$
- Grafu budú vnútri slučky, aktualizované každou iteráciou
- Treba použiť funkciu **Bundle** na zviazanie polí pre os X a Y do clusteru a ten priviesť do indikátora **XY Graph (Silver)**

Ukážka predného panelu programu:



Obr. 4: Ukážka predného panelu laboratórnej úlohy č. 1

Výsledky laboratórnej úlohy:

- Identifikované prístroje
- Nastavený pracovný bod pomocou numerickej metódy
- Vytvorený testovací vektor napätí U_{pp}
- Zmerané grafy Linearity a $THD+N$
- Zdôvodnená vzájomná súvislosť týchto grafov

B. Laboratórna úloha č.2

Meranie frekvenčnej charakteristiky zosilňovača

Zadanie laboratórnej úlohy:

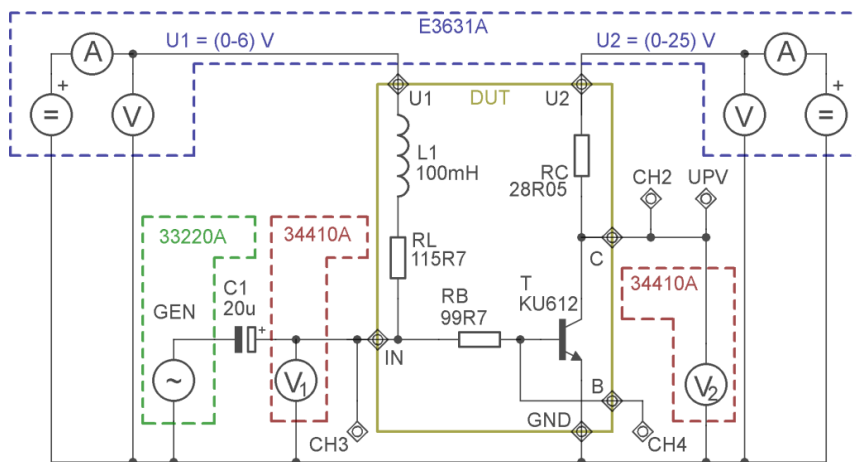
1. Pripojte, programovo identifikujte a resetujte všetky prístroje
2. Manuálne nastavte DC zdroj, určte vhodný pracovný bod, zistite vhodnú amplitúdu signálu na meranie frekvenčnej charakteristiky
3. Použitím generátora a osciloskopu zmerajte frekvenčnú charakteristiku zosilňovača $A_U [dB] = f(f [Hz])$.

Teoretický úvod:

Pri meraní frekvenčnej charakteristiky sa nastavuje frekvencia generátora v širokom rozsahu pri rovnakej amplitúde harmonického signálu. Sleduje sa napäťová zosilňovacia vlastnosť zapojenia v závislosti od týchto frekvencií. Na vertikálnu os sa vynáša zosilnenie v dB:

$$A_U = 20 * \log \left(\frac{U_{OUT} [V]}{U_{IN} [V]} \right) [dB] \quad (1)$$

Schéma zapojenia prípravku je zobrazená na obr. 1.

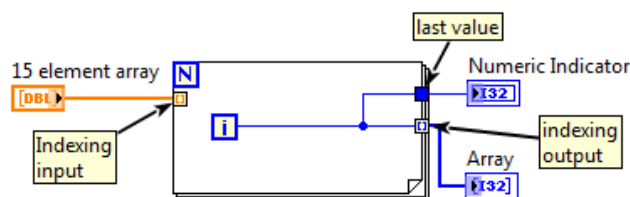


Obr. 1 Schéma zapojenia prípravku

Tunely v LabVIEW:

Pri použití štruktúr (slučky, case structure, ...) je možné privádzať a odvádzať signály rôznymi spôsobmi. Na hraniciach sú tunely, ktoré plnia rozdielne funkcie.

Pri „for“ slučke je možné nastaviť 3 typy tunelov (obr. 2).



Obr. 2 : Ukážka tunelov vo for slučke

- *Indexing input* – Ak nie je privedená hodnota do *count* terminálu (N), slučka sa môže indexovať privedeným poľom. V každej iterácii je dostupný jeden prvok poľa. Počet iterácií závisí na dĺžke privedeného vektora.
- *Last value* – Cez tunel prejde posledná hodnota po skončení iterovania slučky. Ak má vektor 15 hodnôt tak na indikátore bude číslo 14.
- *Indexing output* – V každej iterácii ukladá hodnoty do vektora. Na indikátore bude pole hodnôt 0 až 14.

„Case structure“ sa používa pri vytváraní podmienok (ako „if“ v textových jazykoch) a vyskytujú sa tu 3 druhy tunelov.

- *tunnel output* – výstup je pripojený vo všetkých prípadoch (case)

- *unwired output* – minimálne v jednom prípade nie je výstup pripojený – generuje error, program sa nedá spustiť

- *use default output* – pravým tlačidlom sa dá zvoliť použitie predvolenej hodnoty keď je tunel z „vnútra“ nepripojený.

Postup merania:

1) Identifikácia, reset zariadení

Pomocou príkazu ***IDN?** a funkciami **VISA Write**, **VISA Read** (na vstup byte count prived'ť konštantu **512**) overte v prostredí LabVIEW komunikáciu s prístrojmi pripojených do zbernice GPIB ktoré budú potrebné pre meranie:

- Generátor: Agilent 33220A
- Osciloskop: R&S RTM 1054

Identifikáciu zariadení (odpoveď) vypíšte na predný panel do indikátora.

Po overení komunikácie zariadenia zresetujte pomocou príkazu ***RST**. Po zresetovaní zariadení zaved'ť oneskorenie 2 s (tab. 1).

2) Nastavenie pracovného bodu

Manuálne na paneli zdroja HP E3631A nastavte napätie $U_2 = 12 \text{ V}$ (výstup 25V). Napätie U_1 nastavte tak, aby mohol zosilňovač dosahovať čo najväčší rozkmit – napätie na voltmetri V_2 musí byť približne polovica napájacieho napätia U_2 .

Zapnite generátor a osciloskop. Nastavte harmonický priebeh s frekvenciou 1 kHz a zistite vhodnú amplitúdu vstupného signálu aby nenastalo orezávanie signálu na

výstupe (sledujte na osciloskope). Veľkosť výstupného signálu nastavujte parametrom U_{pp} . Zistenú hodnotu použijete pri meraní kmitočtovej charakteristiky.

3) Meranie frekvenčnej charakteristiky

Na meranie efektívnych hodnôt vstupného a výstupného signálu bude použitý osciloskop.

3.1) Vytvorenie testovacieho vektora

Každý meraný bod charakteristiky zodpovedá jednému kmitočtu nastavenému na generátore. Vytvorte si logaritmicky rozložený vektor frekvencií, ktorými budete nastavovať generátor v rozmedzí **100Hz až 10MHz** (Logaritmické rozloženie je rovnomerné rozloženie exponentov X v 10^X). Použite **for** slučku a numerické funkcie (+,-,*,/). Konverzia celočíselného formátu (z iteračného terminálu) sa dá vykonať použitím funkcie **To Double Precision Float**. Ďalej bude potrebné použiť **Logarithm base 10** a **Power of 10**. Vytvorte ovládacie prvky na zvolenie hodnôt frekvencií od – do a počet krokov (hodnôt vektora). Vektor si zobrazte na indikátore a overte.

3.2) Meranie linearity, THD+N

Pred časťou programu, kde bude meranie prebiehať v iteráciách v slučke treba nastaviť potrebné funkcie prístrojov (zbytočné nastavovať v každej iterácii). Na nastavenie generátora použite príkazy z tab. 1. Príkazy môžete zapísať pomocou jednej funkcie **VISA Write** oddelené novým riadkom alebo bodkočiarku (;).

Tab. 1 : Príkazy potrebné na obsluhovanie generátora 33220A

FUNC SIN	Nastavenie priebehu funkcie - sínus
VOLT:UNIT VPP	Jednotka nastavení napätia – hodnota špička-špička
VOLT 1.25V	Nastavenie napätia $U_{pp} = 1,25$ V. Príkaz podporuje aj jednotky (mV).
FREQ 1e3	Nastavenie frekvencie na 1 kHz
VOLT:OFFS 0 V	Nastavenie offsetu na 0 V
OUTP ON	Zopnutie výstupu
OUTP OFF	Vypnutie výstupu

Nastavenie osciloskopu použite sekvenciou nasledujúcich príkazov. Po tomto nastavení naprogramujte 1 s oneskorenie (prístroj musí pozapínať dané obvody).

TRIG:A:SOUR EXT;	Zvolenie externého vstupu triggera
CHAN2:STAT 1;	Zapnutie kanálu 2
CHAN2:COUP ACLimit;	Nastavenie AC väzby na kanál 2
CHAN2:BAND B200;	Obmedzenie šírku pásma na 200MHz
CHAN2:POS 0;	Zobrazenie priebehu na stred displeja
CHAN3:STAT 1;	Zapnutie kanálu 1
CHAN3:COUP ACLimit;	Nastavenie AC väzby na kanál 1
CHAN3:BAND B200;	Obmedzenie šírku pásma na 200MHz
CHAN3:POS 0;	Zobrazenie priebehu na stred displeja

Meranie zostavte tak, aby sa každý meraný bod zobrazil do grafu už pri meraní.

Pre každý bod charakteristík (v jednej iterácii **for** slučky) je potrebné:

- Nastaviť frekvenciu generátora (z hodnoty pripraveného vektora)
 - Iba jedným príkazom z tab. 2 (ostatné je nastavené pred slučkou).
 - Hodnotu dosádzajte v exponenciálnom tvare „% . ; %e“ (tab. 2)
- Nastaviť časovú základňu osciloskopu
 - Príkazom **TIMEbase:SCALE Y;** sa nastaví na Y s/dielik. Hodnotu dosádzajte v exponenciálnom tvare „% . ; %e“ (tab. 2)
 - Vypočítajte z nastavovanej frekvencie tak, aby sa zobrazili 2 periódy.
- Nastaviť vertikálne zosilňovače osciloskopu pre kanál 2 (U_{OUT}), vytvorte autoscale
 - Príkazom **CHAN2:SCAL X;** sa nastaví rozlíšenie napätia na X V/dielik pre kanál 2.
 - Najprv nastavte väčšiu hodnotu (pre vstupný signál 1V, pre výstupný 2V), odčítajte pomocou príkazu:
MEAS2:SOUR CH2
MEAS2:RES? PEAK
 špičkovú hodnotu a znovu upravte vertikálne rozlíšenie tak, aby bol signál zobrazený aspoň na 6 dielikoch (vybudené A/D prevodníky). Číslo za slovom MEAS určuje v ktorej kolónke displeja osciloskopu sa zobrazí meranie.
 - Medzi dopýtaním sa na hodnotu a prečítaním výsledku zaveďte oneskorenie 2 s (meria sa pri čítaní)
- Nastaviť vertikálne zosilňovače osciloskopu pre kanál 3 (U_{IN}), vytvorte autoscale (viď. 3.)
- Odčítať efektívnu hodnotu vstupného a výstupného signálu (CH3, CH2)
 - Príkaz :



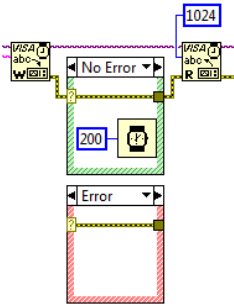
MEAS1:SOUR CH2

MEAS1:RES? RMS

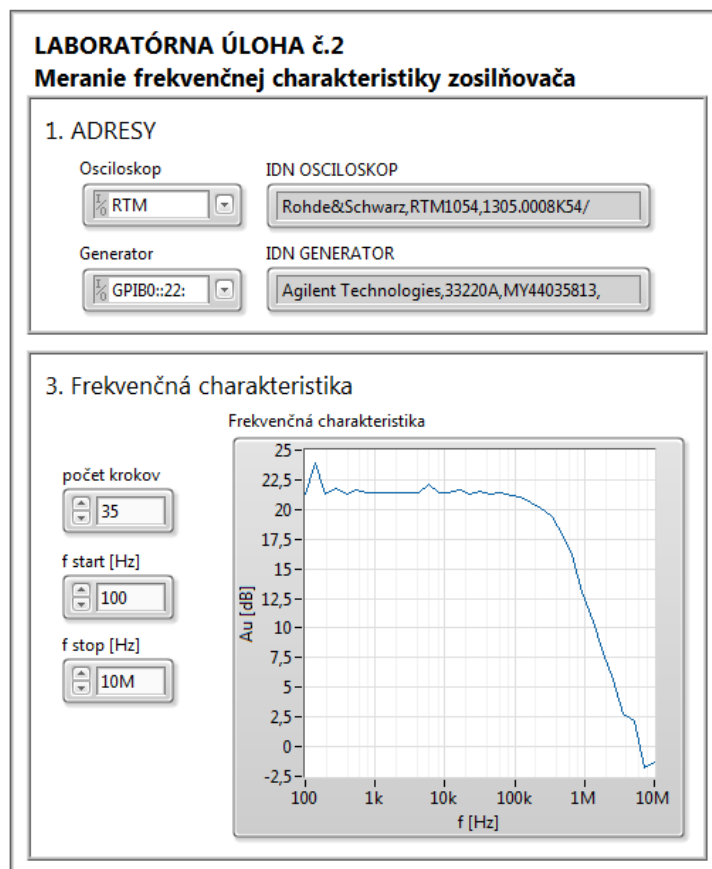
6. Vypočítať zosilnenie podľa vzťahu (1)
7. Pridať hodnotu frekvencie do poľa
 - Pole bude možné v slučke meniť (treba použiť **Shift register**) a pridávať hodnotu do poľa pomocou **Build Array** (pravým tl. Concatenate inputs)
 - Nezabudnite pred slučkou inicializovať Shift register prázdnu konštantou poľa double
8. Pridať hodnotu zosilnenia do poľa (viď 7.)
9. Aktualizovať údaje do grafu
 - Frekvenčná charakteristika - $A_U [\text{dB}] = f(f [\text{Hz}])$.
 - Grafu budú vnútri slučky, aktualizované každou iteráciou
 - Treba použiť funkciu **Bundle** na zviazanie polí pre os X a Y do clusteru a ten priviesť do indikátora **XY Graph (Silver)**.

Os frekvencii bude logaritmická a čísla osi budú v SI notácii (10k, 100k, ...)

Tab. 2 : Funkcie LabVIEW, ktoré je možné pri vypracovaní použiť

While loop	Slučka iteruje až pokiaľ sa do „conditional terminal“ -  „privedie log. 1
For loop	Slučka iteruje N krát. Počet iterácií je daný číslom privedeným do count terminálu -  , alebo privedeným poľom.
Case structure	Využitie pri podmienkach (if)
VISA funkcie (Open, Write, Read, Close)	Obsluhovanie komunikácie s prístrojmi
Scan From String	Konverzia odpovede meranej hodnoty (prijatý string) na číslo formátu double. Formátovací reťazec na správne prečítanie je „% . ; %f“.
Format Into String	Konverzia čísla double na string pre poslanie príkazu do prístroja. Zástupné znaky pre číslo sú „% . ; %f“ alebo „% . ; %e“ v exponenciálnom formáte (hlavne pre frekvencie).
Wait (ms)	Časové oneskorenie (použiť na ustálenie po nastavení, resete)
Build Array	Vytváranie, dopĺňanie polí
One Button Dialog	Notifikácia užívateľa malým oknom s jedným tlačidlom
Merge Errors	Spája viac vetiev error clusteru do jedného. Typicky po otvorení, identifikácii, resete zariadení.
<p>Oneskorenie pomocou Case structure a Wait (ms)</p> 	<p>LabVIEW funguje na princípe dataflow. Každý blok (node) sa spustí až keď má hodnotu na všetkých pripojených vstupoch.</p> <p>Pri ovládaní prístrojov často treba zaviesť časové oneskorenie (po resete, po nastavení hodnoty, atď..). Na tento účel je vhodné použiť error cluster (zelená prerušovaná čiara) privedený do case structure. Ak v priebehu komunikácie nenastala nijaká chyba vykoná sa stav „No Error“ kde sa spustí funkcia Wait (ms), čo oneskorí tok dát o zadanú hodnotu času v ms.</p> <p>V prípade chyby (napr. nezadaná adresa) je oneskorenie zbytočné, pretože ani samotné funkcie LabVIEW sa nevykonajú, iba preposielajú chybu.</p>

Ukážka predného panelu programu:



Obr. 3 : Ukážka predného panelu laboratórnej úlohy č. 2

Výsledky laboratórnej úlohy:

- Identifikované prístroje
- Manuálne nastavený pracovný bod
- Vytvorený testovací vektor frekvencií
- Zmeraný graf frekvenčnej charakteristiky
- Určená medzná frekvencia zosilňovača

C. Laboratórna úloha č.3

Meranie striedavej prúdovej prevodnej charakteristiky

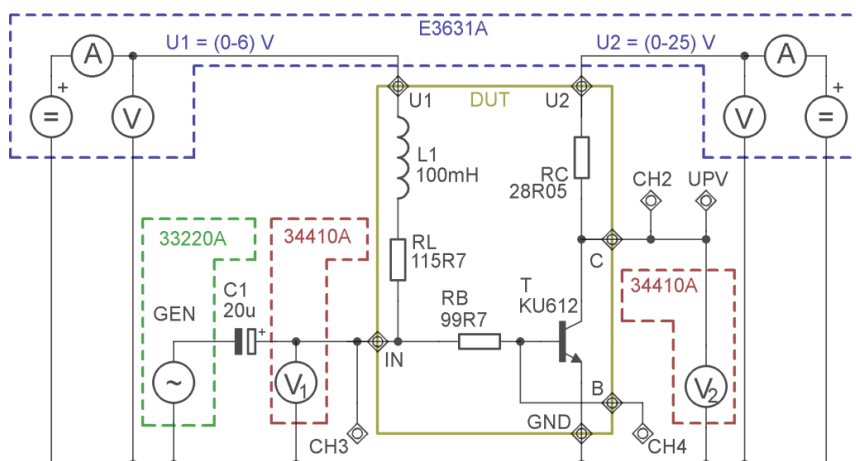
Zadanie laboratórnej úlohy:

1. Pripojte, programovo identifikujte a resetujte všetky prístroje
2. Manuálne nastavte DC zdroj, určte vhodný pracovný bod.
3. Použitím generátora a osciloskopu zmerajte závislosť striedavej zložky kolektorového prúdu na striedavej zložke bázového prúdu. $I_C [\text{mA}] = f(I_B [\text{mA}])$.

Teoretický úvod:

Pri meraní charakteristiky sa nastavuje špičková hodnota napätia na generátore v širokom rozsahu pri rovnakej frekvencii harmonického signálu. Sleduje sa prúdová zosilňovacia vlastnosť zapojenia v závislosti od veľkosti efektívnej hodnoty bázového prúdu. Na vertikálnu os sa vynáša efektívna hodnota kolektorového prúdu.

Schéma zapojenia prípravku je zobrazená na obr. 1.

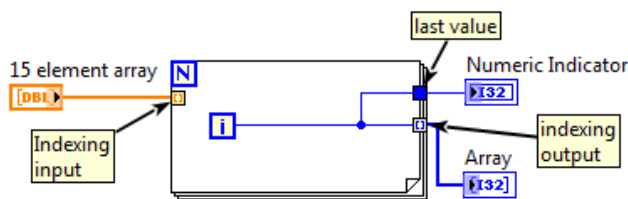


Obr. 1 : Schéma zapojenia prípravku


Tunely v LabVIEW:

Pri použití štruktúr (slučky, case structure, ...) je možné privádzať a odvádzať signály rôznymi spôsobmi. Na hraniciach sú tunely, ktoré plnia rozdielne funkcie.

Pri „for“ slučke je možné nastaviť 3 typy tunelov (obr. 2)





Obr. 2 : Ukážka tunelov vo for slučke

- *Indexing input* – Ak nie je privedená hodnota do *count* terminálu () , slučka sa môže indexovať privedeným poľom. V každej iterácii je dostupný jeden prvok poľa. Počet iterácii závisí na dĺžke privedeného vektora.
- *Last value* – Cez tunel prejde posledná hodnota po skončení iterovania slučky. Ak má vektor 15 hodnôt tak na indikátore bude číslo 14.
- *Indexing output* – V každej iterácii ukladá hodnoty do vektora. Na indikátore bude pole hodnôt 0 až 14.

„Case structure“ sa používa pri vytváraní podmienok (ako „if“ v textových jazykoch) a vyskytujú sa tu 3 druhy tunelov.

 - *tunnel output* – výstup je pripojený vo všetkých prípadoch (case)

 - *unwired output* – minimálne v jednom prípade nie je výstup pripojený – generuje error, program sa nedá spustiť

 - *use default output* – pravým tlačidlom sa dá zvoliť použitie predvolenej hodnoty keď je tunel z „vnútra“ nepripojený.

Postup merania:

1) Identifikácia, reset zariadení

Pomocou príkazu ***IDN?** a funkciami **VISA Write**, **VISA Read** (na vstup byte count prived'ťe konštantu **512**) overte v prostredí LabVIEW komunikáciu s prístrojmi pripojených do zbernice GPIB ktoré budú potrebné pre meranie:

- Generátor: Agilent 33220A
- Osciloskop: R&S RTM 1054

Identifikáciu zariadení (odpoveď) vypíšte na predný panel do indikátora.

Po overení komunikácie zariadenia zresetujte pomocou príkazu ***RST**. Po zresetovaní zariadení zaveďte oneskorenie 2 s (tab. 2).

2) Nastavenie pracovného bodu

Manuálne na paneli zdroja HP E3631A nastavte napätie $U_2 = 10\text{ V}$ (výstup 25V). Napätie U_1 nastavte tak, aby mohol zosilňovač dosahovať čo najväčší rozkmit – napätie na voltmetri V_2 musí byť približne polovica napájacieho napätia U_2 .

3) Meranie striedavej prúdovej prevodnej charakteristiky

Na meranie prúdov je použitý osciloskop. Bázový prúd sa určí z úbytku napätia na odpore R_B a kolektorový prúd z napätia na kolektore. Budú použité matematické funkcie osciloskopu.

3.1) Vytvorenie testovacieho vektora

Každý meraný bod charakteristiky zodpovedá jednému vstupnému AC napätiu nastavenému na generátore. Vytvorte si vektor hodnôt napätí U_{pp} , ktorými budete nastavovať generátor v rozmedzí (0,02 – 2) V s dostatočne malým krokom (pre začiatok na 10 hodnôt). Použite **for** slučku a numerické funkcie (+, -, *, /). Konverzia celočíselného formátu (z iteračného terminálu **i**) sa dá vykonať použitím funkcie **To**

Double Precision Float. Vytvorte ovládacie prvky na zvolenie hodnôt napätí od – do a počet krokov (hodnôt vektora). Vektor si zobrazte na indikátore a overte.

3.2) Meranie prúdovej prevodnej charakteristiky

Pred časťou programu, kde bude meranie prebiehať v iteráciách v slučke treba nastaviť potrebné funkcie prístrojov (zbytočné nastavovať v každej iterácii). Na nastavenie generátora použite príkazy z tab. 1. Príkazy môžete zapísať pomocou jednej funkcie **VISA Write** oddelené novým riadkom alebo bodkočiarku (;). Merajte pri frekvencii 1 kHz.

Tab. 1 : Príkazy potrebné na obsluhovanie generátora 33220A

FUNC SIN	Nastavenie priebehu funkcie - sínus
VOLT:UNIT VPP	Jednotka nastavení napätia – hodnota špička-špička
VOLT 1.25V	Nastavenie napätia $U_{pp} = 1,25$ V. Príkaz podporuje aj jednotky (mV).
FREQ 1e3	Nastavenie frekvencie na 1 kHz
VOLT:OFFS 0 V	Nastavenie offsetu na 0 V
OUTP ON	Zopnutie výstupu
OUTP OFF	Vypnutie výstupu

Nastavenie osciloskopu pred meraním je zložitejšie lebo sa využívajú 3 kanály plus ďalší ktorý vznikne rozdielom CH3 – CH4. Použite sekvenciou nasledujúcich príkazov. Na príkazy pre každý kanál a spoločné príkazy použite vždy jednu funkciu **VISA Write** (celkom teda 5x). Po tomto nastavení naprogramujte 4 s oneskorenie (prístroj musí pozapínať dané obvody).

TRIG:A:SOUR EXT;	Zvolenie externého vstupu triggera
TIMEbase:SCALE 0.2 ms;	Nastavenie časovej základne na 0,2 ms / dielik
CHAN2:STAT 1;	Zapnutie kanálu 2
CHAN2:COUP ACLimit;	Nastavenie AC väzby na kanál 2
CHAN2:BAND B20;	Obmedzenie šírku pásma na 20MHz
CHAN2:POS 0;	Zobrazenie priebehu na stred displeja
CHAN3:STAT 1;	Zapnutie kanálu 3
CHAN3:COUP ACLimit;	Nastavenie AC väzby na kanál 3
CHAN3:BAND B20;	Obmedzenie šírku pásma na 20MHz
CHAN3:POS 0;	Zobrazenie priebehu na stred displeja
CHAN4:STAT 1;	Zapnutie kanálu 4
CHAN4:COUP ACLimit;	Nastavenie AC väzby na kanál 4
CHAN4:BAND B20;	Obmedzenie šírku pásma na 20MHz
CHAN4:POS 0;	Zobrazenie priebehu na stred displeja
CHAN1:ARIT SMO;	Zapnutie vyhladenia priebehu
CALC:MATH1:EXPR:DEF "CH3-CH4";	Nastavenie rovnice
CALC:MATH1: ON;	Zapnutie matematickej funkcie
CALC:MATH1:STAT 1;	Zapnutie kanálu MA1



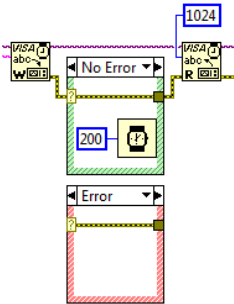
Meranie zostavte tak, aby sa každý meraný bod zobrazil do grafu už pri meraní.

Pre každý bod charakteristík (v jednej iterácii **for** slučky) je potrebné:

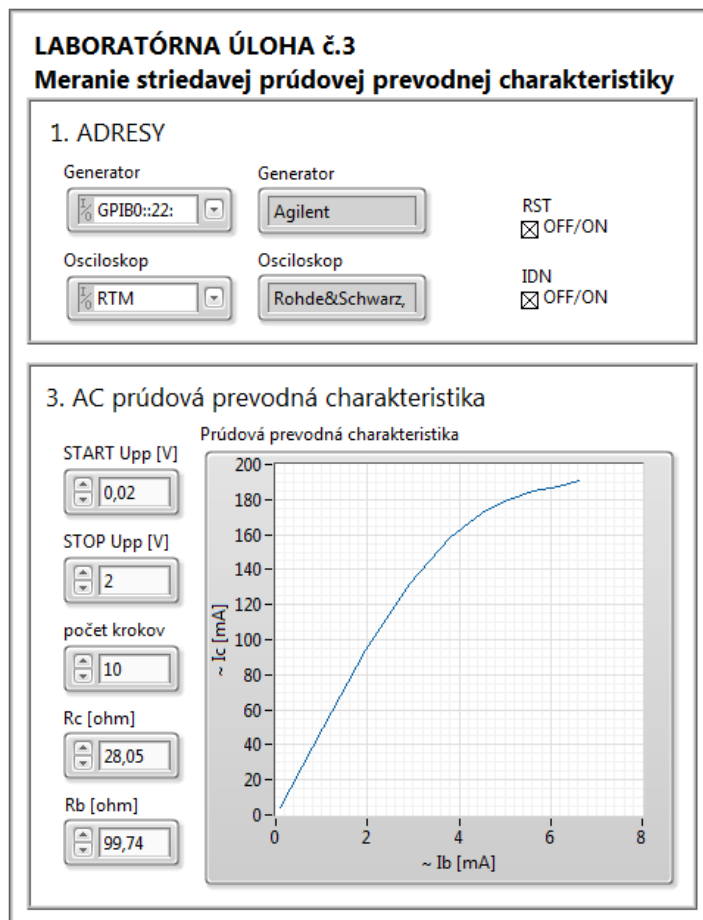
- Nastaviť špičkové napätie generátora (z hodnoty pripraveného vektora)
 - Iba jedným príkazom z tab. 2 (ostatné je nastavené pred slučkou) po ktorom treba zaviesť dostatočné oneskorenie
- Nastaviť vertikálne zosilňovače osciloskopu pre kanál 2 (U_{OUT}), vytvorte autoscale
 - Príkazom **CHAN2:SCAL X;** sa nastaví rozlíšenie napätia na X V/dielik pre kanál 2.
 - Najprv nastavte väčšiu hodnotu (pre vstupný signál a bázu 1V, pre výstupný 2V), odčítajte pomocou príkazu:
MEAS2:SOUR CH2
MEAS2:RES? PEAK
 špičkovú hodnotu a znovu upravte vertikálne rozlíšenie tak, aby bol signál zobrazený aspoň na 6 dielikoch (vybudené A/D prevodníky). Číslo za slovom MEAS určuje v ktorej kolónke displeja osciloskopu sa zobrazí meranie.

- Medzi dopýtaním sa na hodnotu a prečítaním výsledku zavedť oneskorenie 2 s (meria sa pri čítaní)
3. Nastaviť vertikálne zosilňovače osciloskopu pre kanál 3 (U_{IN}), vytvorte autoscale (vid'. 3.)
 4. Nastaviť vertikálne zosilňovače osciloskopu pre kanál 4 (U_B), vytvorte autoscale (vid'. 3.)
 5. Zmerať efektívnu hodnotu rozdielu signálov CH3 – CH4 z už nastavenej matematickej funkcie MA1
 - Príkaz
MEAS1:SOUR MA1
MEAS1:RES? RMS
 6. Pomocou hodnoty R_B vypočítať z úbytku napätia bázy prúd
 7. Pridať hodnotu prúdu I_B [mA] do poľa
 - Pole bude možné v slučke meniť (treba použiť **Shift register**) a pridávať hodnotu do poľa pomocou **Build Array** (pravým tl. Concatenate inputs)
 - Nezabudnite pred slučkou inicializovať Shift register prázdnu konštantou poľa double
 8. Zmerať efektívnu hodnotu kolektorového napätia.
 - Príkaz:
MEAS2:SOUR CH2
MEAS2:RES? RMS
 9. Pomocou hodnoty R_C vypočítať z úbytku napätia kolektorový prúd. Kolektorový prúd je úmerný napätiu na kolektore podľa odporu R_C .
 10. Pridať hodnotu prúdu I_C [mA] do poľa (vid'. 7.)
 11. Aktualizovať údaje do grafu
 - Prúdové prevodná charakteristika - I_C [mA] = f (I_B [mA]).
 - Grafu budú vnútri slučky, aktualizované každou iteráciou
 - Treba použiť funkciu **Bundle** na zviazanie polí pre os X a Y do clusteru a ten priviesť do indikátora **XY Graph (Silver)**.

Tab. 2 : Funkcie LabVIEW, ktoré je možné pri vypracovaní použiť

While loop	Slučka iteruje až pokiaľ sa do „conditional terminal“ -  „privedie log. 1
For loop	Slučka iteruje N krát. Počet iterácií je daný číslom privedeným do count terminálu -  , alebo privedeným poľom.
Case structure	Využitie pri podmienkach (if)
VISA funkcie (Open, Write, Read, Close)	Obsluhovanie komunikácie s prístrojmi
Scan From String	Konverzia odpovede meranej hodnoty (prijatý string) na číslo formátu double. Formátovací reťazec na správne prečítanie je „% . ; %f“.
Format Into String	Konverzia čísla double na string pre poslanie príkazu do prístroja. Zástupné znaky pre číslo sú „% . ; %f“ alebo „% . ; %e“ v exponenciálnom formáte (hlavne pre frekvencie).
Wait (ms)	Časové oneskorenie (použiť na ustálenie po nastavení, resete)
Build Array	Vytváranie, dopĺňanie polí
One Button Dialog	Notifikácia užívateľa malým oknom s jedným tlačidlom
Merge Errors	Spája viac vetiev error clusteru do jedného. Typicky po otvorení, identifikácii, resete zariadení.
<p>Oneskorenie pomocou Case structure a Wait (ms)</p> 	<p>LabVIEW funguje na princípe dataflow. Každý blok (node) sa spustí až keď má hodnotu na všetkých pripojených vstupoch.</p> <p>Pri ovládaní prístrojov často treba zaviesť časové oneskorenie (po resete, po nastavení hodnoty, atď..). Na tento účel je vhodné použiť error cluster (zelená prerušovaná čiara) privedený do case structure. Ak v priebehu komunikácie nenastala nijaká chyba vykoná sa stav „No Error“ kde sa spustí funkcia Wait (ms), čo oneskorí tok dát o zadanú hodnotu času v ms.</p> <p>V prípade chyby (napr. nezadaná adresa) je oneskorenie zbytočné, pretože ani samotné funkcie LabVIEW sa nevykonajú, iba preposielajú chybu.</p>

Ukážka predného panelu programu:



Obr. 3 : Ukážka predného panelu laboratórnej úlohy č. 3

Výsledky laboratórnej úlohy:

- Identifikované prístroje
- Manuálne nastavený pracovný bod
- Vytvorený testovací vektor napätí U_{pp}
- Zmeraný graf prúdovej prevodnej charakteristiky pre striedavý signál
- Porovnanie smernice lineárnej časti grafu (h_{21e}) pre frekvenciu 1 kHz a 1MHz